UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LABORATÓRIO REMOTO PARA ENSINO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

IGOR BITTENCOURT LOUREIRO

DM 19 / 2009

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IGOR BITTENCOURT LOUREIRO

LABORATÓRIO REMOTO PARA ENSINO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LABORATÓRIO REMOTO PARA ENSINO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

AUTOR: IGOR BITTENCOURT LOUREIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA A AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

APROVADA EM: 11 / 09 / 2009

BANCA EXAMINADORA:

____

Profa. Dra. Maria Emilia de Lima Tostes
(ORIENTADORA – UFPA)

____

Prof. Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Junior
(MEMBRO – UFPA)

____

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(MEMBRO – UFPA)

____

Prof. Dr. Ricardo Silva The
(MEMBRO – UFC)

VISTO:

____

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(COORDENADOR DO PPGEE / ITEC / UFPA)

AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar meu caminho e me guiar até a realização dessa conquista.

A minha família por todo apoio e estímulo. Aos meus pais, Luiz e Rosely, por sempre acreditarem e investirem na educação dos seus filhos. Aos meus irmãos, Yuri, Tagore e Sergei, por sempre estarem dispostos a ajudar no que fosse preciso.

A Vanderlene por sempre estar ao meu lado em todos os momentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade de qualificação. Aos funcionários da secretaria do referido programa por serem solícitos no atendimento aos alunos.

Ao Professor Marcus Vinicius Alves Nunes pelo incentivo e motivação para cursar a pós-graduação.

A Professora Maria Emília de Lima Tostes que, com toda sua experiência e visão, aceitou o desafio de desenvolver este trabalho e contribuiu de forma decisiva para seu sucesso.

Aos colegas do LAMOTRIZ: Allan, Airton, Thiago, Thiane, Michele, Fábio, Fabrício, Vitor e Oscarina. Em especial agradeço ao Caio e ao Paulo pelas aulas de *Labview*, ao Bosco pela ajuda com a Hidráulica e ao Rogério e ao Henrique pelas valiosas opiniões.

Aos meus amigos Maurício e Daniel, que me acompanham desde a época do Cefet, sempre enaltecendo as vitórias e amenizando as derrotas.

"Se enxerguei mais longe, foi porque me apoiei nos ombros de gigantes".
Sir Isaac Newton

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **1**
1.1 Motivação **2**
1.2 Objetivos **3**
1.3 Justificativa **4**
1.4 Revisão Bibliográfica **5**
1.5 Organização do Trabalho **7**
2. ENERGIA ELÉTRICA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA **9**
2.1 Introdução **9**
2.2 Definição de Energia **9**
2.3 Eficiência Energética **10**
2.4 Indicadores de Desempenho em Energia Elétrica **13**
2.4.1 Consumo Específico de Energia **13**
2.4.2 Custo Médio de Energia e Fator de Carga da Instalação **14**
2.5 Leis de Eficiência Energética **16**
2.5.1 Lei n° 9.991 .... **16**
2.5.2 Lei n° 10.295 .... **16**
2.5.3 Lei n° 11.465 .... **18**
2.6 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL **18**
2.6.1 Áreas de Atuação **19**
2.6.1.1 Procel Indústria 21
2.7 Conclusão **28**
3. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA **30**
3.1 Introdução **30**
3.2 Instalações de Bombeamento **30**
3.2.1 Diâmetro das Tubulações **31**
3.2.2 Perdas de Carga **32**
3.2.3 Curva Característica da Instalação **35**
3.3 Bomba de Fluxo **36**
3.3.1 Bombas Centrífugas **39**
3.3.2 Curvas de Desempenho das Bombas Centrífugas **40**
3.3.2.1 Curva Altura x Vazão 40
3.3.2.2 Curva Potência x Vazão 41
3.3.2.3 Curva Rendimento x Vazão 42

3.3.2.4 Curva NPSH x Vazão 42
3.3.3 Variação das Curvas Características 43
3.4 Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento 46
3.4.1 Oportunidades de Economia 47
3.4.1.1 Uso Final de Água 48
3.4.1.2 Redução de Vazamentos 48
3.4.1.3 Melhoria da Rugosidade da Tubulação 49
3.4.1.4 Melhoria do Rendimento do Motor e da Bomba 49
3.4.1.5 Variadores de Velocidade 50
3.4.2 Indicadores de Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento de Água. 51
3.5 Conclusão 51
4. ARQUITETURA DO LABORATÓRIO REMOTO 53
4.1 Introdução 53
4.2 Descrição dos Equipamentos 53
4.2.1 Motor de Indução Trifásico 55
4.2.2 Conversor de Freqüência Trifásico 56
4.2.3 Bomba Centrífuga 56
4.2.4 Instalação de Bombeamento 58
4.2.5 Válvula Proporcional 58
4.2.6 Transdutor de Pressão 59
4.2.7 Sensor de Vazão 60
4.2.8 Sensor de Nível 60
4.2.9 Central de Medidas 61
4.2.10 Controlador Lógico Programável 61
4.3 Automação 62
4.3.1 Rede Industrial 62
4.4 Projeto de Software 63
4.4.1 Modelo Ambiental 64
4.4.1.1 Declaração de Objetivos 64
4.4.1.2 Diagrama de Contexto 64
4.4.1.3 Lista de Eventos 66
4.4.2 Modelo Comportamental 66
4.4.2.1 Diagrama de Fluxo de Dados - DFD 66
4.4.2.2 Dicionário de Dados 73
4.4.2.3 Diagrama Entidade Relacionamento - DER 75

4.4.2.4 Diagrama de Transição de Estados - DTE..76
4.5 Aspectos de Programação..**79**
4.5.1 Métricas de Implementação...**80**
4.6 Conclusão **81**
5. LABORATÓRIO REMOTO PARA ENSINO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA...**82**
5.1 Introdução...**82**
5.2 Software para Controle do Protótipo de Bombeamento D'água do LAMOTRIZ...**82**
5.3 Ensaio Piloto de Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento D'água.......**86**
5.3.3 Resultados do Ensaio Piloto..**87**
5.3.4 Avaliação do Ensaio Piloto **90**
5.3.5 Rendimento dos Alunos no Ensaio Piloto...**95**
5.4 Conclusão **96**
6. CONCLUSÃO...**98**
6.1 Trabalhos Futuros..**99**
7. REFERÊNCIAS **100**
APÊNDICE I – ROTEIRO DA EXPERIÊNCIA..**104**
APENDICE II – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO **107**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Plano de estudos do CGIEE 17
Figura 2.2 – Bancada de Bomba Centrífuga (PROCEL, 2009)........ 23
Figura 2.3 – Bancada de Ar Comprimido (PROCEL, 2009)........ 24
Figura 2.4 - Bancada Ventilador/Exaustor (PROCEL, 2009). 25
Figura 2.5 – Bancada Correia Transportadora (PROCEL, 2009)........ 26
Figura 2.6 - Interligação da Rede Local com Intranet / Internet (PROCEL, 2009). 27
Figura 3.1 – Instalação de Bombeamento Simples........ 31
Figura 3.2 – Curva do sistema 36
Figura 3.3 – Rotores radial, misto e axial (HADDAD, 2006). 37
Figura 3.4 – Rotores radiais de simples sucção e dupla sucção (HADDAD, 2006). 37
Figura 3.5 – (a) Bomba radial, simples sucção, um estágio e eixo horizontal. 38
Figura 3.6 - Classificação das bombas com relação à posição do eixo em relação ao nível d’água (HADDAD, 2006). 39
Figura 3.7 – Rotores fechado, aberto e semi-aberto (HADDAD, 2006). 39
Figura 3.8 – Curva da bomba KSB WKL 125 (GAIO; MONTEIRO, 2005)........ 41
Figura 3.9 – Curva Potência x Vazão (GAIO; MONTEIRO, 2005). 42
Figura 3.10 – Curva rendimento x vazão (GAIO; MONTEIRO, 2005)........ 42
Figura 3.11 – Curva NPSH x Vazão (GAIO; MONTEIRO, 2005)........ 43
Figura 3.12 – Ponto de Operação (GAIO; MONTEIRO, 2005). 43
Figura 3.13 – Rendimento no ponto de operação (GAIO; MONTEIRO, 2005). 44
Figura 3.14 - Potência no ponto de operação (GAIO; MONTEIRO, 2005). 44
Figura 3.15 - Ajuste de vazão por estrangulamento de válvula........ 45
Figura 3.16 – Variação da velocidade na curva da bomba. 46
Figura 3.17 – Diagrama de balanço de energia com as perdas do sistema (GAIO; MONTEIRO, 2005). 47
Figura 4.1 – Diagrama esquemático dos equipamentos. 54
Figura 4.2 – Protótipo de bombeamento d’água. 55
Figura 4.3 – Motor elétrico de indução trifásico. 56
Figura 4.4 – Bomba centrífuga KSB Meganorm 25-150. 57
Figura 4.5 – Curva Altura x Vazão da bomba KSB Meganorm 25-150. 57
Figura 4.6 – Curva do NPSH x Vazão da bomba KSB Meganorm 25-150. 58
Figura 4.7 – Curva da Potência x Vazão da bomba KSB Meganorm 25-150. 58
Figura 4.8 – Válvula proporcional VEP-45 KMC Controls 59
Figura 4.9 – Medidor de pressão SIEMENS SITRANS P DS III 59

Figura 4.10 – Sensor de vazão SIEMENS SITRANS F M MEGAFLO 5000........................60
Figura 4.11 – Sensor de nível SIEMENS SONAR BERO..60
Figura 4.12 – Multimedidor digital SIEMENS MID-144..61
Figura 4.13 – Rede de comunicação PROFIBUS-DP..62
Figura 4.14 – Sistema de automação do LAMOTRIZ..63
Figura 4.15 – Diagrama de contexto do sistema de software para controle do protótipo. 65
Figura 4.16 – DFD nível 0 do sistema de software para controle do protótipo.......................68
Figura 4.17 – DFD nível 1 do sistema de software para controle do protótipo.......................69
Figura 4.18 – DFD nível 2 do sistema de software para controle do protótipo.......................71
Figura 4.19 – DFD nível 3 do sistema de software para controle do protótipo.......................72
Figura 4.20 – DER do sistema de software para controle do protótipo 76
Figura 4.21 – DTE da função “MOVIMENTAR VÁLVULA PROPORCIONAL” 77
Figura 4.22 – DTE da função “ALTERAR VELOCIDADE DO MOTOR” 78
Figura 4.23 – Trecho do código gráfico do *software* 81
Figura 5.1 – Interface de identificação de usuário do sistema..83
Figura 5.2 – Interface de rejeição de identificação do usuário do sistema. 84
Figura 5.3 – Interface principal do sistema. 85
Figura 5.4 – Planilha com os dados gravados. 86
Figura 5.5 – Gráfico Potência X Vazão para os dois métodos. 88
Figura 5.6 – Gráfico Energia X Vazão para os dois métodos. 89
Figura 5.7 – Modelo de qualidade para qualidade interna e externa (ABNT, 2003). 91
Figura 5.8 – Gráfico com respostas da questão 1 do formulário. 92
Figura 5.9 – Gráfico com respostas da questão 2 do formulário. 93
Figura 5.10 – Gráfico com respostas da questão 3 do formulário. 93
Figura 5.11 – Gráfico com respostas da questão 4 do formulário. 94
Figura 5.12 – Gráfico com respostas da questão 5 do formulário. 94
Figura 5.13 – Gráfico com rendimento dos alunos da pós-graduação. 95
Figura 5.14 – Gráfico com rendimento dos alunos graduação. 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Abreviaturas utilizadas nas figuras (PROCEL, 2009). 27
Tabela 2.2 – LAMOTRIZES no Brasil. 28
Tabela 3.1 – Oportunidades de economia (GAIO; MONTEIRO 2005). 47
Tabela 4.1 – Descrição dos equipamentos da bancada. 53
Tabela 4.2 – Principais características do motor de indução trifásico. 56
Tabela 4.3 – Sinais de entrada do SIEMENS SIMATIC S7-200 61
Tabela 4.4 – Saídas do SIEMENS SIMATIC S7-200 61
Tabela 4.5 – Lista de eventos do sistema de software para controle do protótipo 66
Tabela 4.6 – Dicionário de dados do sistema de software para controle do protótipo 74
Tabela 4.7 – Notação do dicionário de dados 75
Tabela 5.1 – Resultados para o método de ajuste de vazão por meio da válvula proporcional. 87
Tabela 5.2 – Resultados para o método de ajuste de vazão por meio da variação da velocidade do motor. 87

RESUMO

A utilização racional da energia elétrica é um tema bastante discutido na atualidade. Uma das principais preocupações é com o setor industrial brasileiro, o qual é responsável pela maior parte do consumo desse tipo de energia, devido à utilização de sistemas motrizes. Aliado a esse fato, a falta de uma abordagem adequada ao ensino de eficiência energética e conservação de energia, em muitos cursos de Engenharia das universidades brasileiras, contribui para o aumento do desperdício de energia elétrica. Neste sentido, este trabalho apresenta um laboratório remoto voltado a realização de ensaios de eficiência energética em um sistema motriz de bombeamento d'água. Para isto, foi desenvolvido um *software* que permite acionar e monitorar o protótipo de bombeamento d'água pertencente ao LAMOTRIZ da Universidade Federal do Pará. Ainda, foi elaborado um ensaio piloto para testar a experimentação remota com alunos de graduação e pós-graduação da referida universidade e foi realizada uma avaliação desta experimentação pelos referidos alunos.

PALAVRAS CHAVES: Eficiência energética, bombeamento d'água, laboratório remoto.

ABSTRACT

The rational use of electric energy is a subject much discussed at present. A major concern is with the Brazilian industrial sector, which is responsible for most of the consumption of such energy, due to the use of motor systems. Allied to this fact, the lack of an appropriate approach to teaching energy efficiency and energy conservation in many Engineering courses in Brazilian universities, contributes to the increase in electricity waste. In this sense, this work presents a remote laboratory aimed at testing the energy efficiency in a system driving water pumping. For this, we developed a software to monitor and trigger the prototype water pumping LAMOTRIZ belonging to the Federal University of Pará. Still, we designed a pilot trial to test the remote experimentation with undergraduate and postgraduate students of that University and conducted an evaluation of this trial by those students.

KEYWORDS: energy efficiency, system driving water pumping, remote laboratory

1. INTRODUÇÃO

O maior desafio da atualidade para a humanidade é a utilização sustentável de seus recursos naturais, em virtude do aumento das necessidades do planeta, e a conseqüente escassez destes recursos. A utilização principal de alguns destes recursos está na geração de energia, seja ela térmica, luminosa, elétrica entre outras. A energia faz parte de nosso cotidiano, essencial para a civilização moderna, sendo utilizada para aquecer, refrescar, iluminar nossas casas, bem como para cozinhar e conservar nossos alimentos.

A energia elétrica insere-se neste contexto como a forma de energia mais prática em virtude da facilidade principalmente de seu transporte e distribuição. A conveniência do emprego da energia elétrica está no fato de sua aplicação aos mais numerosos e variados fins, como em uso doméstico, público, comercial e industrial.

No setor industrial a eletricidade tem papel indispensável sendo que grande parte do valor agregado aos produtos industriais advém do insumo energia elétrica. Sem a base de sustentabilidade proveniente da energia elétrica, as indústrias voltariam a trabalhar como parques manufatureiros, fazendo a produção cair assustadoramente. Os empregados seriam explorados para aumentarem a produção, os lucros despencariam e milhares de outros malefícios viriam em seguida.

Por outro lado, a facilidade no acesso a energia pode ter como conseqüência a utilização indevida, ou melhor, desnecessária. A partir da percepção deste cenário técnicas de conservação da energia elétrica passaram a ser disseminadas na maioria dos países do mundo, como forma de combate ao desperdício e utilização mais eficiente da energia elétrica.

Neste sentido, o Governo do Brasil vem agindo de modo a incentivar a redução do desperdício ligado ao consumo e a demanda de energia elétrica no país. O primeiro passo foi dado em 1985 com a criação do PROCEL (Programa Brasileiro de Conservação de Energia Elétrica). De 1986 até o final do ano de 2007, o PROCEL ajudou a economizar 28,5 bilhões de MWh, consumo equivalente a 16,3 milhões de residências e à energia gerada por uma hidrelétrica de capacidade instalada de 6.841MW, que teria um custo aproximado de R$ 19,9 bilhões (PROCEL, 2009).

Em um segundo momento, o governo brasileiro instituiu três leis voltadas a eficiência energética: a lei n° 9.991, de 24 de julho de 2000, a lei n° 10.295, de 17 de outubro de 2001 e a lei n° 11.465 de 28 de março de 2007.

Dessa forma, a eficiência energética, como instrumento da conservação de energia, cada vez mais se aproxima das necessidades do cidadão brasileiro, principalmente, daqueles que compõem corpos docentes e discentes de nossas universidades. Surge então a necessidade de sistemas, metodologias, tecnologias, materiais e equipamentos, os quais possibilitem a melhoria da eficiência eletro energética, sejam conhecidos por professores e alunos do ensino superior, principalmente os de engenharia e arquitetura, os quais estão diretamente conectados ao tecnicismo envolvido com esse tema (HADDAD, 2006).

1.1 Motivação

A utilização da energia em geral nem sempre é entendida pelo homem. Os problemas relacionados a este tema ficam escondidos por esta falta de entendimento. Melhorar o processo de ensino na área é de fundamental importância no atual contexto, principalmente em países em desenvolvimento. Como aliada a esta melhoria surgem as novas tecnologias de informação, como um verdadeiro desafio nos mais diversos meios e níveis acadêmicos em toda a sociedade (SILVA; SENA; FISCARELLI, 2006).

Durante a ultima década pode-se observar o rápido desenvolvimento das redes de computadores e a Internet. A Web, um dos serviços da Internet mais conhecidos, propiciou meios para a disponibilização e acesso a grandes volumes de informações em diversos formatos. Estas características se mostraram bastantes promissoras para o desenvolvimento de ambientes voltados a educação à distância e presencial.

Na busca pela melhoria do ensino e o desenvolvimento da pesquisa na área de eficiência energética, o desenvolvimento de ferramentas didáticas que auxiliem o processo ensino-aprendizagem torna-se essencial. A experimentação remota tem a vantagem de oferecer ao usuário situações e fenômenos que são difíceis de simular, além de permitir a interação com problemas e características exclusivas dos sistemas reais.

Um laboratório remoto pode ser definido como uma interface de *software* responsável por controlar experimentos reais, sendo que estes são realizados remotamente. Os parâmetros de controle são repassados a interface e esta os converte em um formato que seja aceito por um computador local, o qual gerencia a execução do experimento. Dessa forma, não é necessária a presença física de alunos no laboratório (POINDEXTER; HECK, 1999).

O conceito de laboratório remoto abre uma série de possibilidades no que diz respeito ao incremento da produção científica e tecnológica.

Para as instituições de ensino podem ser oferecidas vantagens no uso de um laboratório remoto, em comparação a um laboratório local, tais como: redução dos custos de instalação, operação e manutenção, menores investimentos na aquisição de equipamentos, atualização permanente de equipamentos, minimizando os custos associados à depreciação e obsolescência. Essas vantagens são adquiridas, principalmente, se houver associação entre duas ou mais instituições, pois os investimentos podem ser divididos entre as participantes.

Outro aspecto importante da associação dessas instituições é o compartilhamento da produção científica advinda das pesquisas realizadas na área. Desse modo, cria-se uma rede de informações, em constante atualização, descentralizando o conhecimento e permitindo acesso aos usuários das instituições associadas.

O equipamento didático remoto permite a construção de um centro didático com equipamentos remotos, e a partir dai o serviço de acesso remoto a esse centro pode ser vendido àqueles usuários que não podem, ou não querem investir na construção de seu próprio laboratório. Essa nova relação permite a redução dos custos relativos à manutenção, aumento da eficiência no atendimento aos chamados de manutenção, considerável aumento do lucro por equipamento didático, aumento da integração com os usuários, maior facilidade na divulgação de novos serviços e produtos.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de um laboratório com acesso remoto para ensaios de eficiência energética em um sistema de bombeamento d'água.

Para atingir esse objetivo, foi desenvolvido um *software* em *Labview*, versão 7.1, para permitir o acionamento e o monitoramento dos dispositivos automatizados do protótipo industrial de bombeamento d'água que compõe o Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes, doado, através de um convênio, pela Eletrobrás/Procel a Universidade Federal do Pará. Este laboratório está vinculado ao Laboratório de Qualidade e Eficiência Energética, localizado na Faculdade de Engenharia Elétrica da referida universidade.

Constitui-se, também, como objetivo deste trabalho, elaborar um ensaio piloto para ser realizado no ambiente do laboratório remoto, de modo a testar suas funcionalidades. O ensaio deverá abordar, sob o ponto de vista da eficiência energética, a comparação de dois métodos de ajuste de vazão em sistemas de bombeamento d'água: estrangulamento da tubulação

através de uma válvula e variação da velocidade do motor elétrico acoplado a bomba, via conversor de freqüência.

Como último objetivo, destaca-se testar a realização do ensaio piloto, através da utilização do *software*, no ambiente do laboratório remoto. Este teste será feito com uma turma de alunos do curso de Pós-Graduação e com outra turma de alunos do curso de Graduação, ambos em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará. Após este teste, os alunos deverão apresentar um relatório do ensaio, o qual irá compor uma parcela de 20% da nota da última avaliação para a turma da pós-graduação e será a nota integral da última avaliação para os alunos da graduação. Ao final os referidos alunos responderão um questionário com objetivo de avaliar o laboratório remoto.

1.3 Justificativa

Recentemente, o Brasil passou por um momento no qual existiam especulações sobre uma crise em seu setor energético, motivadas pelo investimento insuficiente em novas usinas geradoras e incertezas quanto ao futuro das usinas térmicas dependentes do gás produzido na Bolívia, em virtude de recentes manobras políticas neste país. O aumento do consumo motivado pelo aumento produtivo e programas de universalização da energia elétrica em nosso país, haja vista que uma quantidade considerável de pessoas não é atendida por este insumo no Brasil, são variáveis que alimentam ainda mais a busca de soluções factíveis para o problema da oferta de energia elétrica no Brasil.

As indústrias brasileiras consomem atualmente cerca de 47% da energia produzida no país, sendo que os sistemas motrizes são responsáveis pelo consumo médio de 55% da energia elétrica destinada ao parque industrial brasileiro (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008).

O motor elétrico pode ser aplicado para acionar diferentes tipos de cargas, como por exemplo: bombas, ventiladores e exaustores, compressores, sistemas de refrigeração, correias transportadoras, pontes rolantes, guindastes entre outras. Estas cargas não podem ser paralisadas para fins de estudo, visto que isso comprometeria a produção industrial e traria prejuízos a este setor. Uma forma de se estudar o comportamento das referidas cargas, sem interferir na produção industrial, é através de ferramentas didáticas de simulação. Através desta classe de ferramentas, pesquisadores, estudantes e profissionais podem simular o comportamento das cargas industriais e abranger diferentes aspectos de funcionamento das mesmas.

Tais fatores servem de estímulo ao aumento da pesquisa em eficiência energética, conservação de energia e/ou utilização inteligente da energia. Além disso, podem servir de base para a solidificação de políticas públicas que garantam o avanço da disseminação dos conceitos e tecnologias para o uso eficiente da energia elétrica.

Com a abrangente presença da Internet no ambiente acadêmico, doméstico e industrial acessos remotos podem ser explorados, ampliando a flexibilidade de recursos didáticos aos usuários (MOSSIN, 2006).

Razões para o crescimento do uso de acesso remoto nesta área englobam, além de aspectos de comodidade ao usuário, o fato de que a metodologia de ensino acadêmico, especificamente na área de acionamento e monitoramento automatizado de sistemas motrizes industriais, passa por um processo de adaptação a novas tecnologias de informação.

Paralelamente às vantagens no desempenho das tarefas do estudante, o acesso remoto e o conceito de educação a distancia (*e-learning*) possibilitam às entidades de ensino uma maximização do aproveitamento de recursos didáticos, como materiais de laboratório, salas de aula, professores, entre outros, além de não existir na literatura um laboratório remoto para ensaios de eficiência energética voltado para sistemas industriais de bombeamento d'água, como pode ser visto na seção de revisão bibliográfica.

1.4 Revisão Bibliográfica

Alguns trabalhos de experimentação remota incluem um sistema automático de testes de circuitos analógicos (KNIGHT; DEWEERTH 1996), um laboratório remoto de medição (ARPAIA et al 1997), um controle robótico (BHANDARI; SHOR 1998), e um equipamento de controle de processos químicos (SHAHEEN et al 1998). Henry (1999) organizou diversas experiências de controle que podem ser executadas através da internet.

Poindexter e Heck (1999) apresentam um tutorial de como criar sítios WWW especializados na educação através da internet, apresentando alguns modelos, exemplos e aplicações específicas de laboratórios remotos.

Gomez, Cervera e Martínez (1999) apresentam um laboratório virtual de instrumentação remota. Em Salzmann et al (1999), é apresentado um laboratório virtual para a realização de experimentos na área de educação em engenharia.

Mossin (2006) apresenta o desenvolvimento de um laboratório remoto para ensino de sistemas de controle distribuídos via rede de campo no protocolo *FOUNDATION Fieldbus* em ambiente simulado.

Atanásio (2006) apresenta o desenvolvimento de um Ambiente Virtual de Aprendizagem (AVA) visando promover a compreensão do aluno sobre o fenômeno da iluminação, no que se refere à propagação da luz e as modificações desta geradas pelas principais variáveis arquitetônicas.

No que diz respeito aos estudos de variação de velocidade de motores de indução, Pottenbaum (1984) apresentou um estudo com objetivo de fornecer um roteiro aos projetistas de sistemas de bombeamento, baseado em um conjunto de características da bomba centrífuga, para ajudar na adequação do acionamento do motor.

Guevara e Carmona (1990) apresentam um estudo sobre a maneira de se variar a velocidade do motor e um algoritmo de controle PID para realizar essa tarefa.

A caracterização do processo industrial como metodologia para análise da eficiência energética foi estudado por Phylipsen et al (1997), mostrando também como a diferença estrutural entre as indústrias com o mesmo processo em diversos países é fator a ser considerado para definição de níveis de eficiência energética.

Em Lyshevski (2001) verificou-se um estudo sobre as tendências de análise e controle não linear de motores de indução, Lyshevski elabora uma técnica inovadora para o controle vetorial de motores de indução.

Zadeh e Hendi (2004) desenvolvem um controlador eficiente para motores de indução, baseado na análise das perdas elétricas neste tipo de motor. O controlador "busca" o ponto de menor consumo de energia elétrica, através da variação contínua do controle de velocidade. O período de busca é pequeno, permitindo a aplicação deste controlador em sistemas com variações freqüentes de velocidade e carga.

Filippo Filho (2005) apresenta uma estimativa do consumo de energia em bombas, ventiladores e compressores, cujo potencial de conservação pode chegar a 11,6 TWh/ano, apresentando também medidas para explorar tal potencial, inclusive questões relativas ao marco regulatório.

Ren e Chen (2006) desenvolvem um controlador para acionamento de motores de indução utilizando uma rede neural recorrente.

Schimidlin (2006) apresenta um estudo comparativo entre o método de ajuste de vazão por uma válvula de estrangulamento e o método de ajuste de vazão pela variação de velocidade do motor elétrico trifásico, por meio do conversor de freqüência, quantificando a redução da potência ativa na operação do segundo método citado.

Machado (2007) realizou um estudo visando a racionalização do uso da energia elétrica em motores de indução, mediante análises criteriosas de viabilidade técnica-econômica. Seus resultados apontaram para três soluções: substituição dos motores tipo Standard por motores de Alto Rendimento; readequação das potências dos motores elétricos e uso de inversores de freqüência no controle de vazão através de controle de velocidade.

Kini et al (2008) apresentam um estudo experimental sobre o impacto da variação de tensão e desequilíbrio no desempenho de um motor de indução acoplado a uma bomba centrífuga, considerando, para análise, as condições de sobretensão e subtensão em conjunto com o desequilíbrio de fase.

1.5 Organização do Trabalho

A dissertação está dividida em 6 capítulos, incluindo esta introdução.

O segundo capítulo, Energia e Eficiência Energética, apresenta uma visão geral sobre o conceito de energia, a estrutura tarifária brasileira e as leis para eficiência energética.

O terceiro capítulo, Sistemas de Bombeamento D’água, discute os principais conceitos, os quais são fundamentais para a compreensão do princípio de funcionamento desses sistemas.

O quarto capítulo, Arquitetura do Laboratório Remoto, apresenta o protótipo de bombeamento d’água do LAMOTRIZ, bem como o projeto do software para controle desse protótipo.

O quinto capítulo, Laboratório Remoto para Ensaio de Eficiência Energética em um Sistema de Bombeamento D’água, apresenta o software e suas funcionalidades, o ensaio piloto desenvolvido, bem como seu teste e sua avaliação por parte dos alunos.

O sexto capítulo, Conclusão, finaliza a Dissertação. Nele são apresentadas as contribuições do trabalho e as questões a serem abordadas futuramente.

2. ENERGIA ELÉTRICA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os conceitos de energia e eficiência energética. Além disso, serão apresentados os indicadores de eficiência energética utilizados para mensurar essa eficiência em um processo.

Serão apresentadas, ainda, duas iniciativas do governo brasileiro para redução do desperdício de energia elétrica: a recente legislação brasileira sobre eficiência energética e a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL. Ao final, apresenta-se com detalhe o subprograma Procel Indústria, que tem como objetivo estudar os sistemas motrizes da indústria brasileira e propor ações para reduzir as perdas de energia elétrica existentes nesses sistemas.

2.2 Definição de Energia

Uma definição bem usual, correspondente ao senso comum e encontrada em muitos livros, afirma que “energia é a medida da capacidade de efetuar trabalho”. Porém, a rigor, esta definição está parcialmente correta e aplica-se a alguns tipos de energia, como a mecânica e a elétrica, que em princípio, são totalmente conversíveis em outras formas de energia (HADDAD, 2006).

Em 1872, Maxwell propôs uma definição que pode ser considerada mais correta do que a anterior: “energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança”. Esta definição refere-se a importantes mudanças de condições e a alterações do estado de um sistema (HADDAD, 2006).

Um conceito importante que, freqüentemente, é relacionado à energia é o da potência. Esta corresponde ao fluxo de energia sobre um determinado tempo, sendo de grande valia para se comparar processos físicos. Em termos gerais, estamos dispostos a atender uma dada demanda energética, medida em kWh, mas sobre a imposição do tempo, resultando em um dado requerimento de potência, avaliada em kW. É possível afirmar que a sociedade moderna, buscando atender suas demandas energéticas de forma rápida, é tão ávida em potência quanto em energia.

Dessa forma, sendo a energia entendida como a capacidade de promover mudanças de estado, esta pode apresentar-se de diversas formas: energias nucleares e atômicas em nível

atômico, energia química sob forma de ligações entre átomos e moléculas, energia elétrica presente na circulação de cargas elétricas através de um campo de potencial elétrico, energia magnética acumulada em campos magnéticos, energia térmica apresentada na forma de radiação térmica, energia mecânica associada a massas com energia cinética e potencial, entre outras formas de energia existentes.

2.3 Eficiência Energética

Segundo Kassik (apud NEGRAO; LOBATO, 2005), o conceito de eficiência energética é baseado no melhor aproveitamento da energia elétrica e no combate ao desperdício, para assim evitar ou diminuir o ritmo de aumento de capacidade do sistema elétrico, reduzindo os impactos ambientais, associados ao aumento da capacidade, preservando os recursos naturais.

Conforme a Primeira Lei da Termodinâmica, a energia total num sistema isolado é constante e, de acordo com a Segunda Lei, a entropia de um sistema isolado tende a um máximo. A eficiência energética de um processo pode ser medida em termos da Primeira ou da Segunda Lei.

Utilizando a Primeira Lei, a eficiência é a razão entre a energia que sai do processo e a energia que entra nele. Já pela Segunda Lei, o quadro é diferente e a eficiência pode ser definida como a razão entre a energia mínima teoricamente necessária para a realização de um processo e a energia efetivamente usada no processo.

Neste caso, os processos de transformação têm a energia como principal insumo e seus produtos medidos em termos de energia. Esta é a abordagem da termodinâmica, que é, essencialmente, a única definição precisa de eficiência energética. Entretanto, em termos econômicos, os produtos são medidos em valores ou unidades físicas de massa. De forma prática, em determinado processo tem-se a energia como insumo e seu produto medido em toneladas ou unidade monetária.

O inverso da eficiência energética é a intensidade energética de um produto ou processo, podendo ser expressa como a quantidade de energia por unidade de produto. No Brasil, assim como nos EUA, Canadá, Reino Unido, França, Japão, Coréia do Sul e México, utiliza-se principalmente os indicadores de intensidade energética para medir a eficiência energética/conservação de energia.

De modo prático, entende-se eficiência energética como o conjunto de práticas e políticas, que reduza os custos com energia e/ou aumente a quantidade de energia oferecida sem alteração da geração. Este conjunto compreende os seguintes elementos:

- Planejamento integrado dos recursos – são práticas que subsidiam os planejadores e reguladores de energia a avaliar os custos e benefícios sob as óticas da oferta (geração) e demanda (consumidor final), de forma a que a energia utilizada pelo sistema seja a de menor custo financeiro e ambiental;

- Eficiência na Geração, Transmissão e Distribuição – são práticas e tecnologias que estimulam a eficiência em toda a eletricidade que é gerada e entregue aos consumidores finais. Esta categoria inclui co-geração e turbinas de queima de gás natural, além de outras tecnologias capazes de disponibilizar maior quantidade de energia elétrica em plantas já existentes.

- Gerenciamento pelo lado da Demanda – são práticas e políticas adotadas pelos planejadores de energia, que encorajam os consumidores a usar a energia de uma forma mais eficiente, além de permitir a administração da curva de carga das concessionárias;

- Eficiência no Uso Final – são tecnologias e práticas que estimulam a eficiência energética no nível do consumidor final. Essa categoria inclui praticamente todos os empregos de eletricidade e tecnologias caloríficas existentes, tais como motores, iluminação, aquecimento, ventilação, condicionamento de ar, entre outros. Também inclui tecnologias que propiciem a conservação e o melhor uso da energia, tais como geradores de energia solar e aparelhos de controle do consumo de energia.

A principal vantagem da eficiência energética é a de ser, quase sempre, mais barata que a produção de energia. Sabe-se que o investimento em tecnologia eficiente para vários usos-finais é alto e que sistemas e equipamentos eficientes possuem, geralmente, custo maior que as tecnologias que substituem.

Entretanto, o custo para conservar 1kWh é, de modo geral, mais barato que o custo para produzi-lo. Além disso, em muitas aplicações, o custo da eficiência energética corresponde a apenas uma pequena parcela dos custos da produção de energia. Tradicionalmente, esses custos são contabilizados por agentes diferentes, sendo ora debitados ao consumidor, à companhia de energia ou ao próprio governo.

Investimentos em eficiência energética tendem a ser incrementais e modulares e com pequeno prazo para retorno. Isto possibilita a implantação de medidas que representem economia de energia e de recursos em período inferior ao de construção de uma usina. Entretanto existe uma barreira à implantação de medidas de eficiência energética, que é a escassez de financiamentos, comparados aos empreendimentos de energia convencional. Esta constatação é reforçada pelo fato de ações de eficiência energética poderem ser feitas no lado da oferta de energia como também no lado do seu uso final. A maioria dos agentes, usuários de eletricidade, nem sempre têm capacidade financeira para arcar com o investimento necessário nem tampouco conseguem atender aos requisitos mínimos requeridos para obtenção de financiamentos bancários.

Essas características sugerem a necessidade da existência de políticas de governo capazes de regulamentar o mercado de eficiência energética, tais como:

- Induzir o desenvolvimento tecnológico;
- Efetuar demonstrações da tecnologia de eficiência energética e suas aplicações;
- Induzir a transformação do mercado de produtos eletro-eletrônicos;
- Adotar padrões de eficiência energética para produtos eletro-eletrônicos e instalações elétricas em construções civis e unidades fabris;
- Estimular a implantação de programas de gerenciamento pelo lado da demanda;
- Formar uma cultura nacional de eficiência energética;
- Implantar programas educativos de eficiência energética;
- Divulgar os resultados obtidos com ações de eficiência energética.

Duarte (2006) enfatizam que a classe industrial é a de maior consumo de energia elétrica do país, conforme informações do Departamento de Estudos Energéticos e Mercado (2004), custando em torno de 146 bilhões de kWh/ano, sendo também responsável por expressiva parcela de desperdício de energia. Além disso, no atual momento de economia globalizada, onde a concorrência se mostra extremamente acirrada, é possível dizer que a eficientização de processos representa uma oportunidade para as indústrias de manufatura melhorarem a sua competitividade. Sendo assim, esta eficientização pode ser considerada como uma ferramenta a ser utilizada por empresas procurando melhorar seu estado atual,

particularmente porque está relacionada às operações, considerada uma fonte de sustentável vantagem competitiva.

Medidas de eficiência energética em sistemas motrizes industriais são ações que buscam maior racionalização do consumo de energia de máquinas e equipamentos constituintes do processo de produção. Essas ações são fundamentadas em diagnósticos energéticos que identificam oportunidades de redução e analisam as melhores propostas para serem implantadas. Assim, partindo dos conceitos de melhoria contínua, são estipuladas metas de custo específico do processo, sendo o consumo energético monitorado para a implantação de novas ações.

As ações compreendem, na maioria das vezes:

- Modificação do projeto, substituindo os equipamentos existentes por equipamentos mais eficientes;
- Modificação na rotina de manutenção, evitando que o equipamento se deteriore e passe a trabalhar consumindo mais energia;
- Mudanças operacionais, ou seja, na forma como determinada operação é realizada no processo.

2.4 Indicadores de Desempenho em Energia Elétrica

A quantificação da melhoria proporcionada por um plano de eficiência energética é obtida através dos indicadores de eficiência energética. Pode-se afirmar, de modo geral, que a eficiência energética aumenta quando se consegue realizar um serviço e/ou produzir um bem com uma quantidade de energia inferior a que era usualmente consumida (HADDAD, 2006).

2.4.1 Consumo Específico de Energia

A análise do consumo de energia (kWh) ou da carga instalada (kW) em relação ao produto gerado, serviço prestado ou a área ocupada produz indicadores de desempenho passíveis de comparação a padrões estabelecidos no país e no exterior (HADDAD, 2006).

Em relação à área ocupada, o índice W/m² é determinado e comparado com as edificações tipológicas e funcionalmente semelhantes, mas, com diferentes níveis de eficiência. Pode-se, dessa forma, projetar padrões muito mais eficientes de consumo de

energia elétrica, considerando-se a utilização de produtos e processos de melhor desempenho energético. Para o cálculo do consumo específico de energia (CE), faz-se:

$$CE_i = \frac{CA_i}{QP_i} \qquad (2.1)$$

onde *CA* é o consumo mensal de energia em kWh/mês, *QP* quantidade de produto ou serviço “produzido” no mês pela unidade consumidora e *i* é o índice referente ao mês de análise do histórico de dados.

É importante ressaltar que o consumo mensal de energia (CA) deve coincidir com o período da quantidade de produto ou serviço produzido no mês (QP). Isto para que não se obtenha resultados incorretos. Torna-se, portanto, importante saber qual o exato período de medição do consumo de energia e a real quantidade produzida neste mesmo período.

2.4.2 Custo Médio de Energia e Fator de Carga da Instalação

O custo médio de energia elétrica depende fortemente da forma como ela e utilizada. Se estiver sendo usada de forma eficiente, seu custo médio será menor, caso contrário, seu custo será maior.

O fator de carga que é deduzido pelos dados das contas de energia é um dos indicadores de eficiência, pois, mostra como a energia está sendo utilizada ao longo do tempo.

Quanto maior for o fator de carga, menor será o custo do kWh. É possível projetar uma economia média em cima da fatura mensal de energia, supondo-se a possibilidade de manter, ao longo do ano, o fator de carga na faixa do mais alto já obtido, no período analisado.

Um fator de carga próximo de 1 (um) indica que as cargas elétricas foram utilizadas de modo racional ao longo do tempo. Por outro lado, um fator de carga baixo indica que houve concentração de consumo de energia elétrica em curto período de tempo, determinando uma demanda elevada. Isto se da quando muitos equipamentos são ligados ao mesmo tempo.

Para obter um fator de carga mais elevado existem três formas básicas:

a) Aumentar o numero de horas trabalhadas, ou seja, aumentando-se o consumo de kWh, porém conservando-se a demanda de potência;

b) Otimizar a demanda de potência, conservando-se o mesmo nível de consumo de kWh;

c) Atuar simultaneamente nos dois parâmetros acima citados.

Para se avaliar o potencial de economia, neste caso, deve-se observar o comportamento do fator de carga nos segmentos horo-sazonais e identificar os meses em que este fator apresentou seu valor máximo. Isto pode indicar que foi adotada, nestes meses, uma sistemática de operação que proporcionou o uso mais racional de energia elétrica. Portanto, seria possível, repetir esta sistemática, após uma averiguação das causas deste alto fator de carga e determinando se este valor pode ser mantido ao longo dos meses.

Desta forma, para cada período, ponta ou fora de ponta, existe um fator de carga diferente. O fator de carga pode ser calculado da seguinte maneira:

$$FC = \frac{CA}{h \times DR} \qquad (2.2)$$

onde *CA* é o consumo de energia, em kWh, no mês na ponta ou fora de ponta, *h* é o número médio de horas no mês, geralmente 66 horas para a ponta e 664 horas para fora de ponta e *DR* é a demanda máxima de potência no mês na ponta e fora de ponta.

Assim, determina-se o fator de carga para as tarifas:

a. Convencional:

$$FC = \frac{CA}{730 \times DR} \qquad (2.3)$$

b. Horo-sazonal Azul no Horário de Ponta

$$FC_p = \frac{CA_p}{66 \times DR_p} \qquad (2.4)$$

c. Horo-sazonal Azul no Horário Fora de Ponta

$$FC_f = \frac{CA_f}{664 \times DR_f} \qquad (2.5)$$

Por último, a análise do custo médio de energia:

$$CMe = \frac{Custo\ \ Total\ \ da\ \ Conta}{Consumo\ \ de\ \ Energia\ \ no\ \ Mês} = \frac{R\$}{kWh} \quad (2.6)$$

O custo médio de energia também é conhecido como custo unitário de energia.

2.5 Leis de Eficiência Energética

Atualmente o Brasil conta com três leis voltadas a eficiência energética: a lei n° 9.991, de 24 de julho de 2000, a lei n° 10.295, de 17 de outubro de 2001 e a lei n° 11.465 de 28 de março de 2007.

2.5.1 Lei n° 9.991

Dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências.

Dessa forma, as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica ficaram obrigadas a aplicar anualmente 0,75% de sua receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico e 0,25% em programas de eficiência energética no uso final.

Ficou estabelecido ainda, que 30% dos recursos que trata a lei serão destinados a projetos desenvolvidos por instituições de pesquisa sediadas nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, incluindo as respectivas áreas das Superintendências Regionais. Além disso, esta lei indicou a constituição de um Comitê Gestor com a finalidade de definir diretrizes gerais e plano anual de investimentos, acompanhar a implementação das ações e avaliar anualmente os resultados alcançados na aplicação dos recursos mencionados anteriormente.

2.5.2 Lei n° 10.295

Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, estabelecendo "níveis máximos de consumo específico de energia ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País" (BRASIL, 2001). Dessa forma, os fabricantes e importadores de máquinas e aparelhos consumidores de energia foram obrigados a adotar as medidas necessárias para obedecerem aos níveis determinados por esta lei.

A regulamentação da lei mencionada anteriormente foi atribuída ao Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE pelo Decreto 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Este comitê é constituído pelo Ministério de Minas e Energia - MME, Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Agência Nacional do Petróleo - ANP, além de um representante de uma universidade e um cidadão brasileiro, ambos especialistas em energia.

O plano de estudos adotado pelo CGIEE está exposto de forma resumida na figura 2.1.

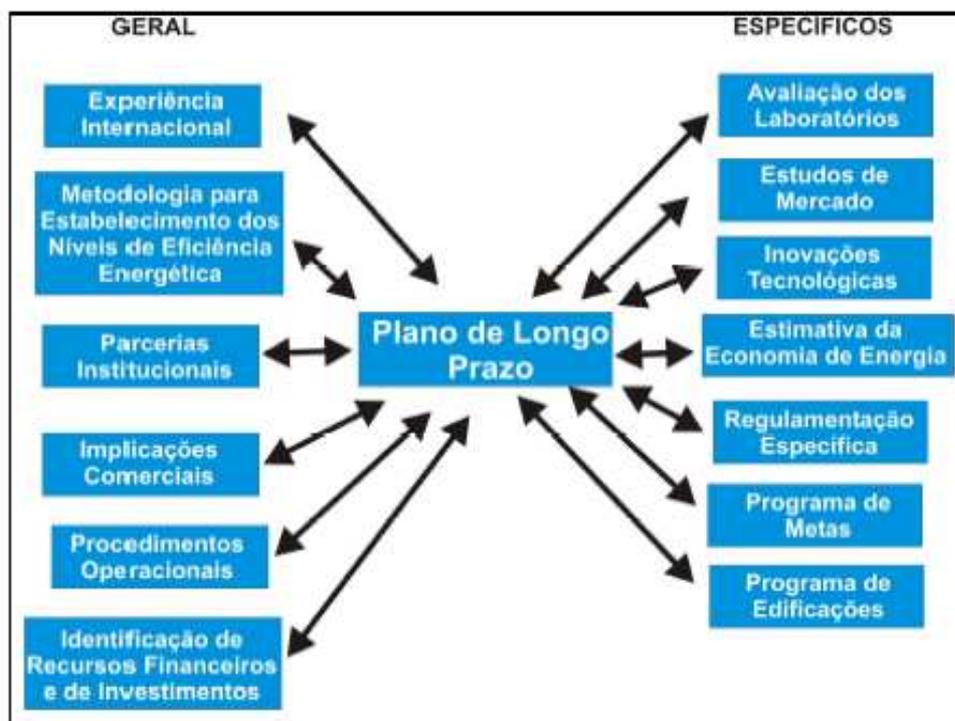



Figura 2.1 – Plano de estudos do CGIEE

Os estudos de abrangência geral têm por objetivo principal montar uma estrutura que possa atender a todos os produtos a regulamentar, cabendo, portanto:

- Avaliar a experiência internacional em programas de padronização e etiquetagem;
- Estudar as diversas metodologias de estabelecimento dos índices mínimos;
- Consolidar parcerias institucionais como, por exemplo, fabricantes e entidades de classe;

- Avaliar as implicações comerciais nos mercados interno e externo, articulando-se a implantação da lei com outras políticas de desenvolvimento industrial e com políticas de comércio exterior;

- Programar procedimentos operacionais para a aplicação sustentada da lei e identificação de recursos disponíveis que possam ser usados no processo.

Os estudos de abrangência específica definirão a aplicação da lei para certo equipamento:

- Avaliação específica dos laboratórios aptos a testarem os equipamentos;

- Estudos de mercado, conhecendo-se os fabricantes, modelos, preços e público consumidor;

- Inovações tecnológicas que possam incrementar o índice de eficiência energética e a própria estimativa de energia economizada com a aplicação da lei;

- Regulamentação específica para cada equipamento, não só para motores elétricos trifásicos, como encontramos atualmente;

- Estabelecimento do programa de metas.

2.5.3 Lei n° 11.465

Altera o percentual de investimentos, estabelecidos pela lei n° 9.991, em pesquisa e desenvolvimento e eficiência energética das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica.

A partir de sua data de publicação, as empresas passaram a aplicar 0,50% de sua receita operacional líquida tanto para pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico, quanto para programas de eficiência energética no uso final.

2.6 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL

O PROCEL foi instituído pela Portaria Interministerial n° 1.877, de 30 de dezembro de 1985, pelo Ministério de Minas e Energia e pelo Ministério da Indústria e Comércio. Sua gestão é realizada por uma Secretaria Executiva subordinada à Eletrobrás.

Através de um Decreto do dia 18 de julho de 1991, o PROCEL foi transformado em Programa de Governo, tendo suas abrangência e responsabilidade ampliadas.

De modo a cumprir seu objetivo, o Programa utiliza recursos da Eletrobrás e da Reserva Global de Reversão - RGR - fundo federal constituído com recursos das concessionárias, proporcionais ao investimento de cada uma. Utiliza, também, recursos de entidades nacionais e internacionais cujos propósitos estejam alinhados aos seus objetivos.

2.6.1 Áreas de Atuação

O Procel tem diversas linhas de atuação, que abrangem diferentes segmentos de consumo de energia. Sua atuação é concretizada por meio de subprogramas específicos, como: (PROCEL, 2009)

Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética: esta área de atuação está voltada para a informação através do Procel Info, que tem a finalidade de criar e manter uma base de conhecimento dinâmica sobre eficiência energética, a partir de informações produzidas no Brasil e no exterior, e disseminá-la para os públicos interessados pelo tema;

Conscientização e Informação: esta área de atuação está voltada para o Marketing através do Prêmio Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, concedido pelo Ministério de Minas e Energia, com base em diretrizes do Governo Federal, como forma de reconhecimento público ao empenho e aos resultados obtidos pelos diversos agentes que atuam no combate ao desperdício de energia. Este prêmio é concedido anualmente a várias categorias, como Transportes, Setor Energético, Edificações, Imprensa, Micro e Pequenas Empresas e Indústria, premiando as ações que se destacaram pelo uso racional de energia e o combate ao seu desperdício.

Eficiência Energética em Edificações: esta área de atuação está voltada para construção civil através do Procel Edifica, que promove condições para o uso eficiente da eletricidade nas edificações aliada ao conforto ambiental, reduzindo os desperdícios de energia, de materiais, e os impactos sobre o meio ambiente. Constituem-se como principais metas deste subprograma: investir em capacitação tecnológica e profissional de forma a reduzir o consumo de energia elétrica nas edificações, atrair um número cada vez maior de parceiros ligados aos diversos segmentos da construção civil, melhorando a qualidade e a eficiência das edificações brasileiras e divulgar os conceitos e práticas do bioclimatismo, por meio da inserção do tema conforto ambiental e eficiência energética nos cursos de Arquitetura e Engenharia.

Eficiência Energética em Equipamentos: esta área de atuação está voltada para os equipamentos eletroeletrônicos através do Procel Selo, que tem por objetivo orientar o consumidor no ato da compra, indicando os produtos que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro de cada categoria, proporcionando assim economia na sua conta de energia elétrica. Também estimula a fabricação e a comercialização de produtos mais eficientes, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico e a preservação do meio ambiente.

Eficiência Energética no Saneamento Ambiental: esta área de atuação está voltada para o saneamento ambiental através do Procel Sanear, que tem como objetivo promover ações que visem ao uso eficiente de energia elétrica e água em sistemas de saneamento ambiental, incluindo os consumidores, segundo uma visão integrada de utilização desses recursos, incentivar o uso eficiente dos recursos hídricos, como estratégia de prevenção à escassez de água destinada à geração hidroelétrica e contribuir para a universalização dos serviços de saneamento ambiental, com menores custos para a sociedade e benefícios adicionais nas áreas de saúde e de meio ambiente.

Eficiência Energética nos Prédios Públicos: esta área de atuação está voltada para o poder público através do Procel EPP, que tem como objetivo promover a economia e o uso racional da energia elétrica nas edificações públicas no Brasil, através de ações de pesquisa tecnológica, divulgação dos conceitos de eficiência energética, e modernização dos sistemas de uso-final da eletricidade nessas instalações.

Gestão Energética Municipal: esta área de atuação está voltada para a gestão municipal através do Procel GEM, que atua como colaborador do administrador público municipal, na gestão e uso eficiente de energia elétrica, nos centros consumidores pertencentes à Prefeitura. Assim, identifica oportunidades de economia e geração de energia, que reduzam desperdícios, elevando ganhos, obtendo, conseqüentemente, maiores recursos para serem utilizados em setores considerados prioritários para a comunidade.

Informação e Cidadania: esta área de atuação está voltada para a educação através do Procel Educação, que envida esforços no sentido de possibilitar a atuação dos professores da Educação Básica (infantil, fundamental e média), como multiplicadores/orientadores de atitudes anti-desperdício de energia elétrica, junto aos seus alunos.

Eficiência Energética na Iluminação Pública e Sinalização Semafórica: esta área de atuação está voltada para melhoria da eficiência energética na iluminação pública através do Procel Reluz, que tem como objetivo promover o desenvolvimento de sistemas eficientes de iluminação pública e sinalização semafórica, bem como a valorização noturna dos espaços públicos urbanos, contribuindo para melhorar as condições de segurança pública e qualidade de vida nas cidades brasileiras.

Eficiência Energética Industrial: esta área de atuação está voltada para a indústria através do Procel Indústria, que enfoca suas ações nas médias e grandes indústrias com o objetivo de realizar levantamento e avaliação de programas e metodologias de eficiência energética, além da elaboração de guias técnicos industriais focados em otimização de sistemas motrizes. Além disso, o programa implanta, através de convênios com universidades, laboratórios de otimização em sistemas motrizes para fins didáticos e, complementarmente, financia bolsas de estudo para desenvolvimento de trabalhos de graduação, mestrado e doutorado, no tema Eficiência Energética em Sistemas Motrizes Industriais.

A seguir, será apresentado de forma mais detalhada o Procel Indústria, devido a grande pertinência do subprograma ao tema deste trabalho.

2.6.1.1 Procel Indústria

O subprograma Procel Indústria foi idealizado na época da crise do abastecimento de energia elétrica, em meados de 2001. Neste período, o Governo Federal instituiu a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica, com a finalidade de elaborar um Plano Estratégico Emergencial de Energia Elétrica, para aumentar a sua oferta e garantir o pleno atendimento da demanda, de modo a reduzir o risco de contingenciamento da carga.

Dentro deste contexto foi concebido o Projeto de Otimização Energética de Sistemas Motrizes, que viria a ser a base para a estruturação do Procel Indústria, com o objetivo de atuar basicamente em duas vertentes de ação.

A primeira vertente visava à promoção de ações para a maior utilização de motores de alto rendimento pelo mercado, como alternativa imediata a redução da demanda por energia no setor industrial. Já a segunda vertente visava minimizar as perdas nos sistemas motrizes já instalados na indústria brasileira, capacitando suas equipes técnicas a desenvolver projetos efetivos destinados à otimização de sistemas motrizes desse setor (PROCEL, 2009).

O motor, sendo um transdutor de energia, transforma eletricidade em força mecânica, podendo acionar cargas como bombas de fluxo, compressores de ar, ventiladores e exaustores. Sistemas com deficiência de manutenção tendem a operar fora das condições originalmente concebidas no projeto e podem apresentar rendimentos ineficientes da ordem de 15 a 75% (PROCEL, 2009).

A otimização de um sistema motriz é complexa, pois envolve a junção de conhecimentos que tradicionalmente estão separados na formação dos engenheiros brasileiros. Esta barreira de conhecimento é forte e se perpetua na atual estrutura de formação dos quadros dos profissionais que atuam nas indústrias.

Neste sentido, a Eletrobrás vêm implantando os Laboratórios de Otimização de Sistemas Motrizes – LAMOTRIZES por intermédio da celebração de convênios com Universidades Federais, preferencialmente nos estados em que estão sendo desenvolvidas ações estruturantes de incentivo ao uso eficiente de energia pelo setor industrial.

Os convênios têm por objetivo a cooperação técnico-financeira para a aquisição de equipamentos visando à montagem do Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes. Este laboratório, com fins didáticos, compreende atividades de ensino, pesquisa e extensão, onde possam ser avaliados aspectos relacionados à Eficiência Energética em Consumidores Industriais. Além disso, estes convênios incluem a concessão de bolsas de estudo que incentivem a pesquisa e o desenvolvimento de teses e temas de estudo que promovam a eficiência e a conservação de energia elétrica em plantas industriais (PROCEL, 2009).

Dentre as principais ações do trabalho de Capacitação e Implantação e do Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes destaca-se a orientação de trabalhos de conclusão de cursos, dissertações de mestrado e teses de doutorado nas áreas de Eficiência e Conservação de Energia Elétrica, bem como a realização de diagnósticos energéticos em instalações industriais (PROCEL, 2009).

O Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes é composto por bancadas de ensaios, para simular sistemas de acionamento através de motores de indução trifásicos padrão e de alto rendimento. As cargas acionadas são: (PROCEL, 2009)

a) Bomba Centrifuga: ilustrada na figura 2.2, composta por um sistema de medição para grandezas elétricas (tensões, correntes, potências ativa e reativa, fator de potência e freqüência) e grandezas mecânicas (pressão, vazão, velocidade angular).

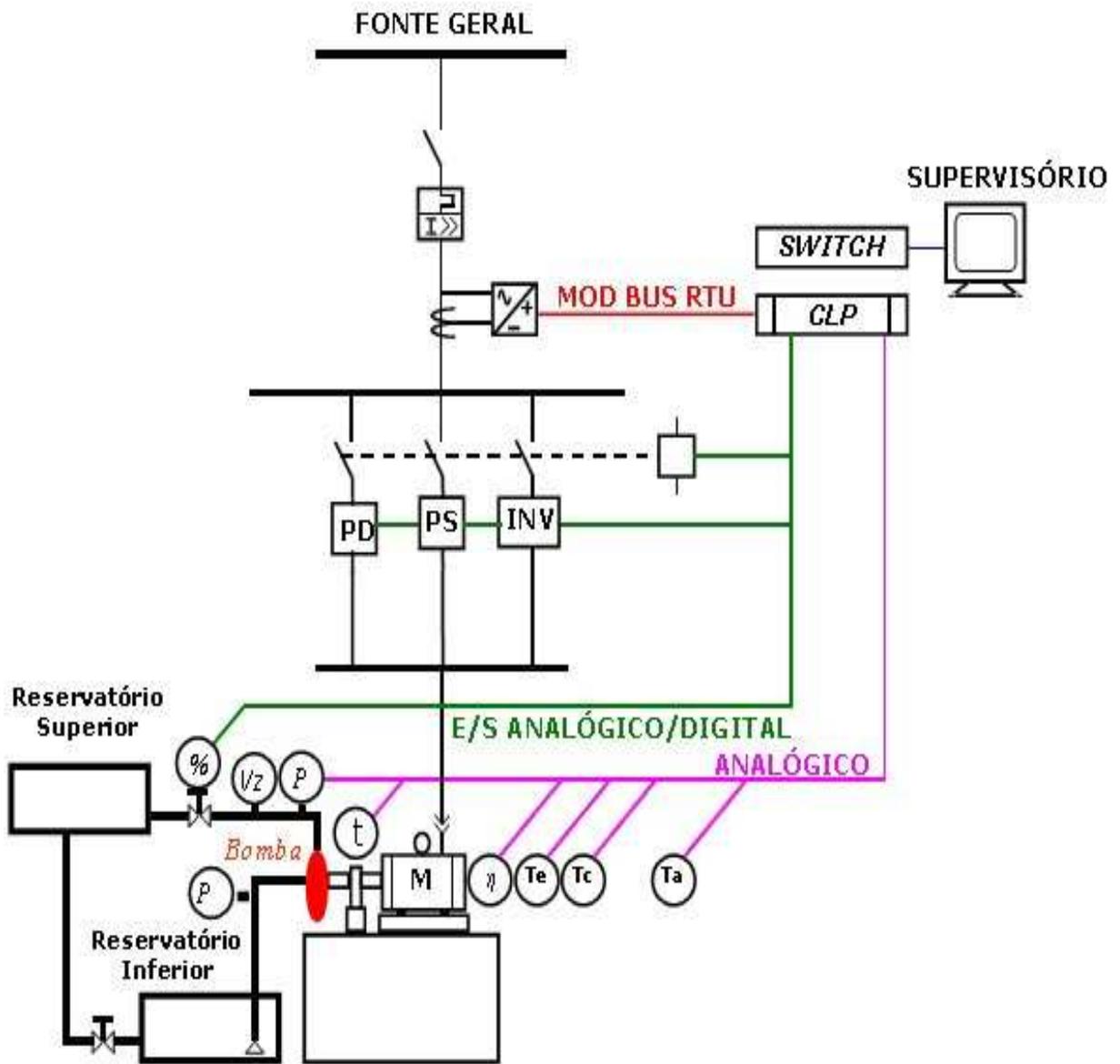



Figura 2.2 – Bancada de Bomba Centrífuga (PROCEL, 2009).

b) Compressor: ilustrado na figura 2.3, composto por um sistema de medição para grandezas elétricas (tensões, correntes, potências ativa e reativa, fator de potência e freqüência) e grandezas mecânicas (pressão e velocidade angular).

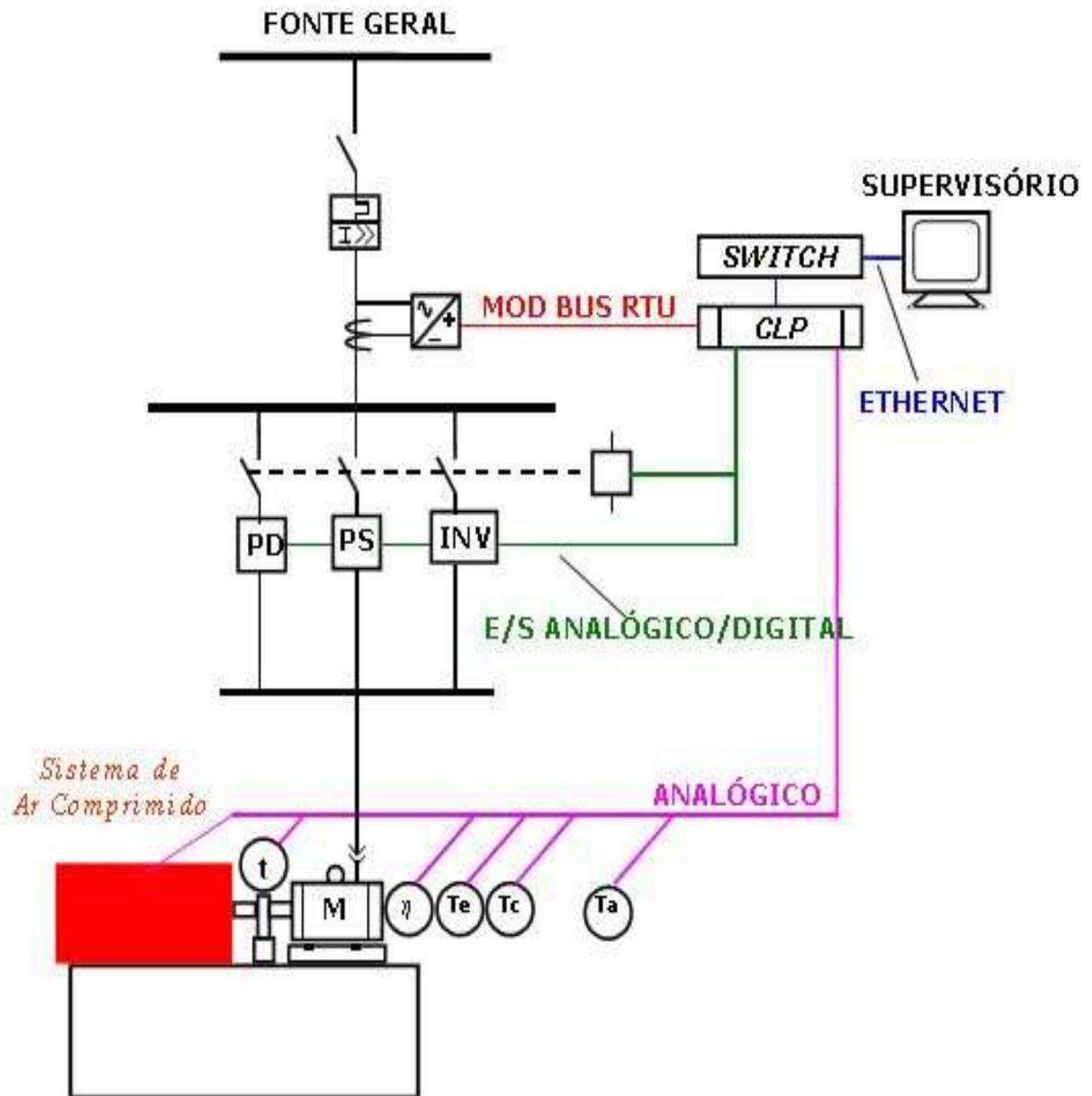



Figura 2.3 – Bancada de Ar Comprimido (PROCEL, 2009).

c) Ventilador/Exaustor: ilustrada na figura 2.4, composta por um sistema de medição para grandezas elétricas (tensões, correntes, potências ativa e reativa, fator de potência e freqüência) e grandezas mecânicas (pressão, vazão, velocidade angular).

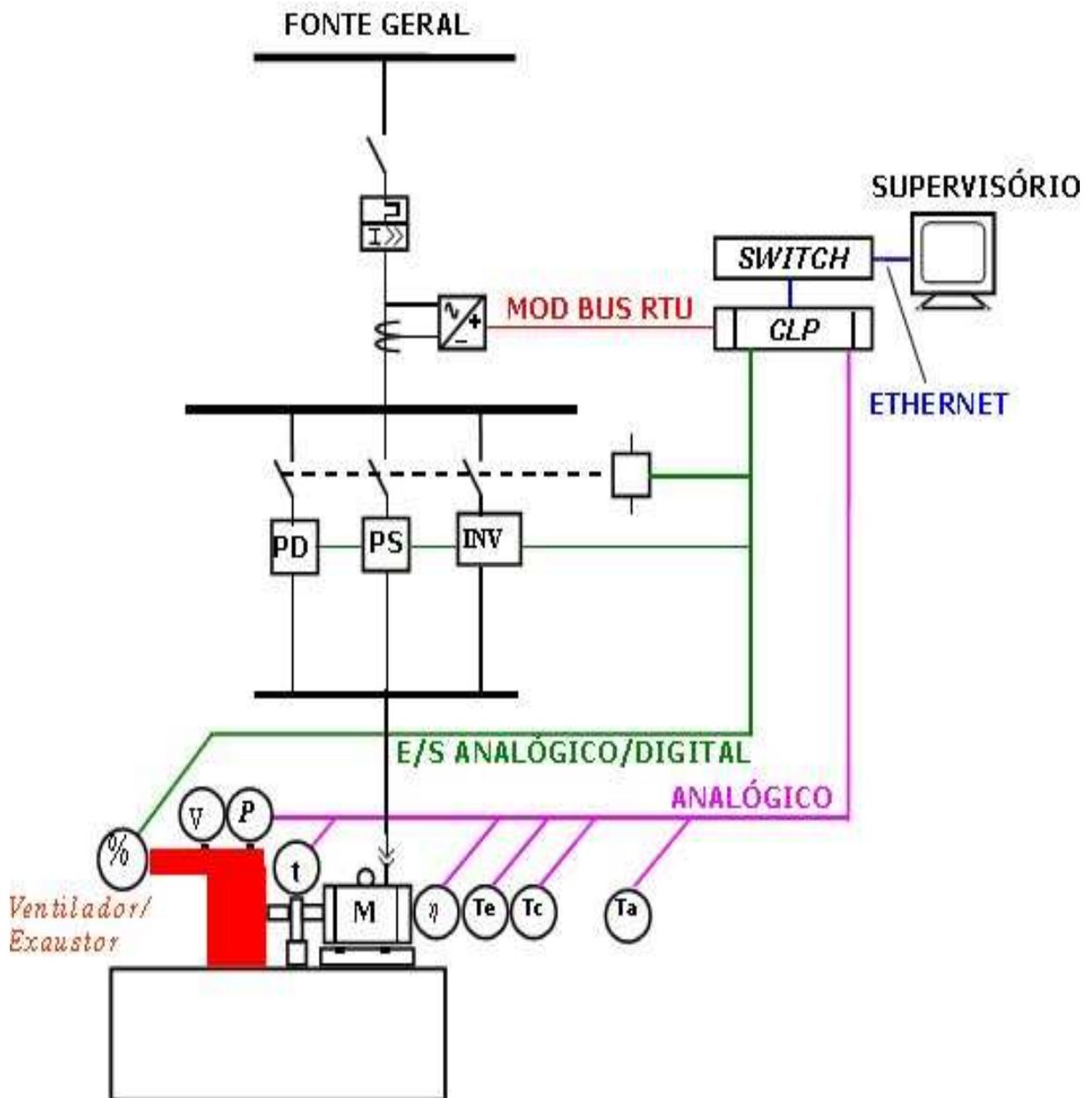



Figura 2.4 - Bancada Ventilador/Exaustor (PROCEL, 2009).

d) Correia Transportadora: ilustrada na figura 2.5, composta por um sistema de medição para grandezas elétricas (tensões, correntes, potências ativa e reativa, fator de potência e freqüência) e grandezas mecânicas (pressão, torque, velocidade angular).

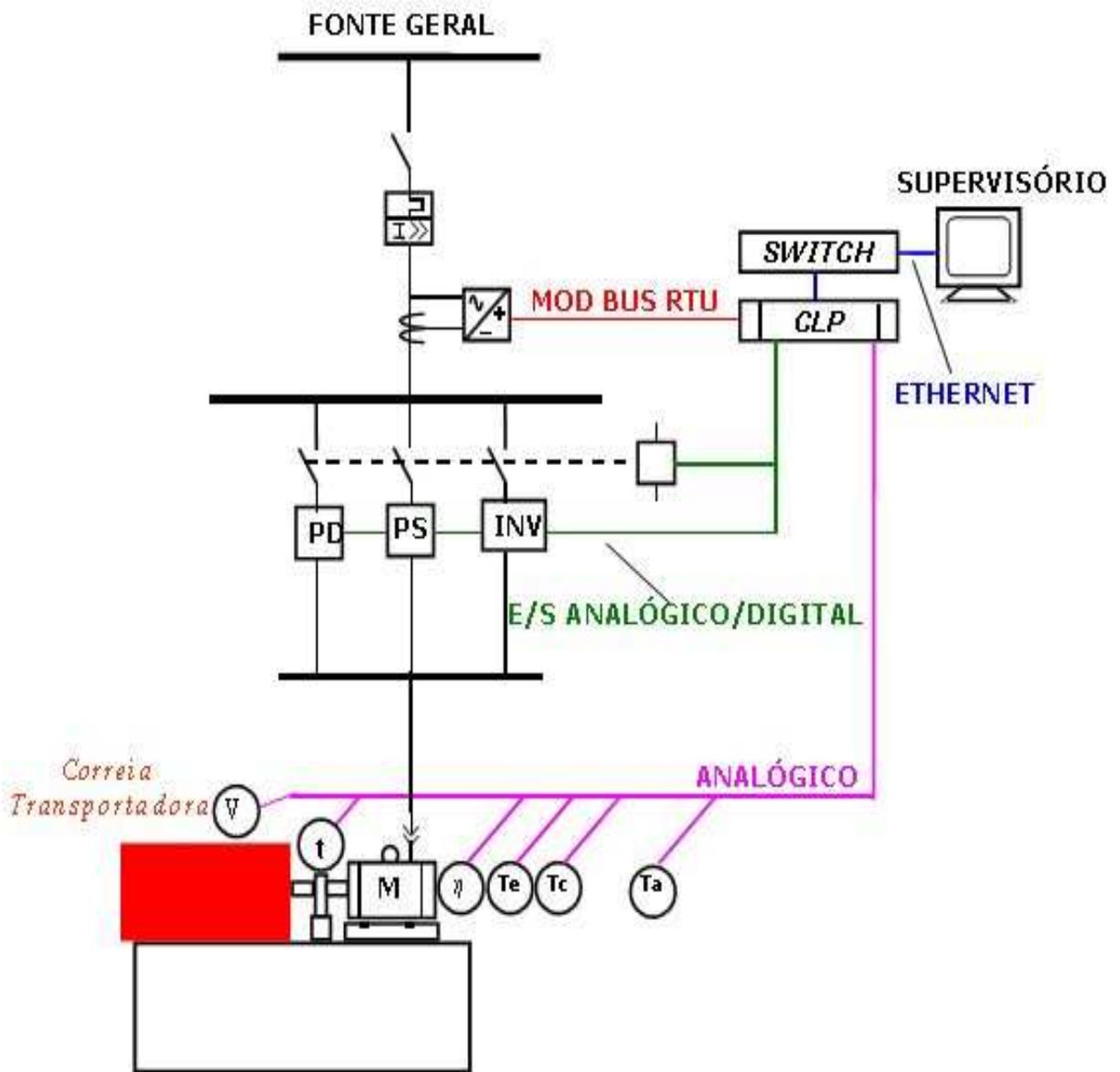



Figura 2.5 – Bancada Correia Transportadora (PROCEL, 2009).

A tabela 2.1 apresenta as abreviaturas utilizadas nas figuras, bem como seus respectivos significados.

Tabela 2.1– Abreviaturas utilizadas nas figuras (PROCEL, 2009).

Abreviatura	Significado	Abreviatura	Significado
INV	Inversor de Freqüência	PS	Partida Suave
PD	Partida Direta	t	Transdutor de Torque
Vz	Transdutor de Vazão	Ta	Temperatura Ambiente
M	Motor	Te	Temperatura do Enrolamento
Mn	Manômetro	Tf	Temperatura da Carcaça
P	Transdutor de Pressão	η	Rotação
CLP	Controlador Lógico Programável	%	Válvula Proporcional
V	Transdutor de Velocidade		

Os Controladores Lógicos Programáveis permitem que os ensaios sejam realizados automaticamente e que os dados sejam registrados e armazenados. Cada bancada possui um supervisório com a função de ajustar os parâmetros dos ensaios e monitorar os sinais eletromecânicos, disponíveis também em indicadores digitais. As bancadas são conectadas entre si através de uma rede de dados local, que faz a interligação a um supervisório central, permitindo que cada ensaio seja visualizado por outros setores da unidade de ensino ou monitorado pela Internet ou pela Intranet da instituição. A figura 2.6 ilustra a arquitetura das bancadas.

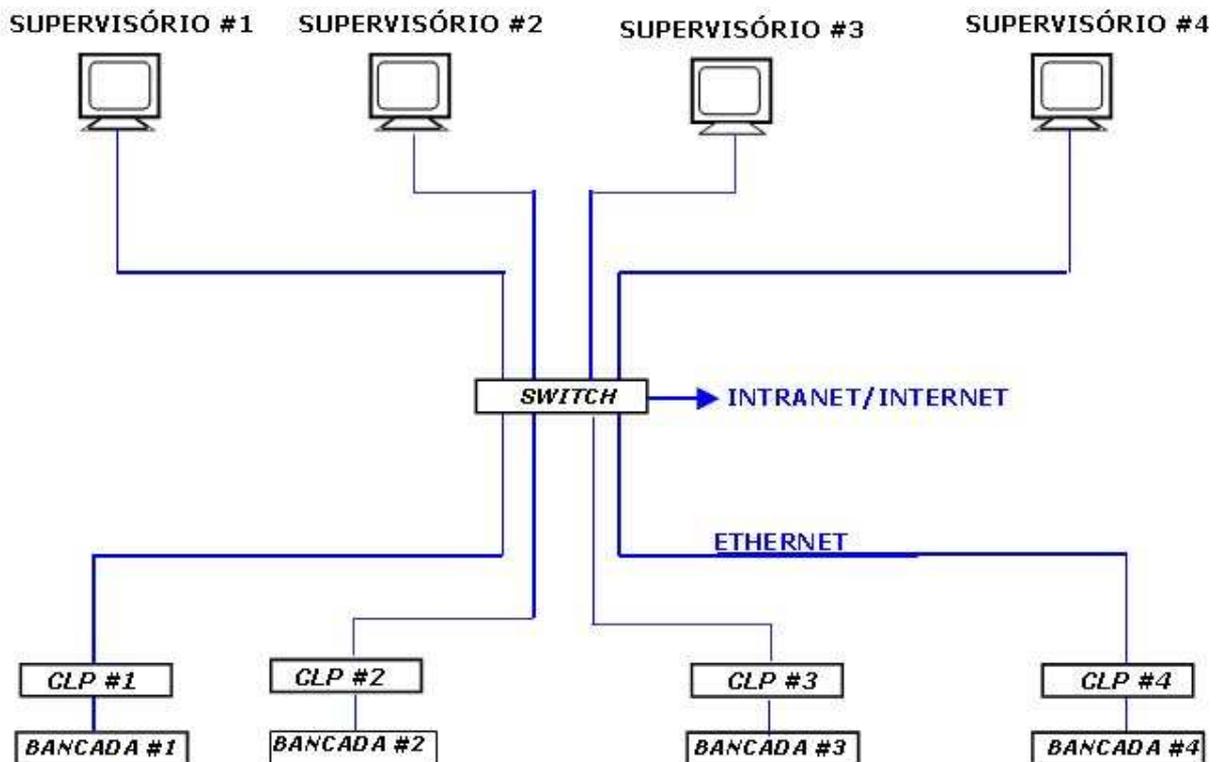



Figura 2.6 - Interligação da Rede Local com Intranet / Internet (PROCEL, 2009).

A tabela 2.2 apresenta os laboratórios que já foram inaugurados, bem como aqueles que estão em fase de comissionamento.

Tabela 2.2 – LAMOTRIZES no Brasil.

<table>
<tr><th>Universidade</th><th>Estado</th><th>Laboratório</th><th>Situação Atual</th></tr>
<tr><td>UFU/FAU</td><td>Minas Gerais</td><td>Comissionado</td><td rowspan="9">Convênios Encerrados</td></tr>
<tr><td>UFMS</td><td>Mato Grosso do Sul</td><td>Comissionado</td></tr>
<tr><td>UDESC/FITEJ</td><td>Santa Catarina</td><td>Comissionado</td></tr>
<tr><td>UFC</td><td>Ceará</td><td>Inaugurado</td></tr>
<tr><td>UFPA</td><td>Pará</td><td>Inaugurado</td></tr>
<tr><td>UFBA</td><td>Bahia</td><td>Inaugurado</td></tr>
<tr><td>UFPE/FADEP</td><td>Pernambuco</td><td>Comissionado</td></tr>
<tr><td>UFMT</td><td>Mato Grosso</td><td>Comissionado</td></tr>
<tr><td>UFAM</td><td>Amazonas</td><td>Comissionado</td></tr>
<tr><td>UFSJ</td><td>Minas Gerais</td><td>Comissionado</td><td rowspan="4">Convênios em processo de encerramento</td></tr>
<tr><td>CEFET-MT</td><td>Mato Grosso</td><td>Comissionado</td></tr>
<tr><td>UNESP</td><td>São Paulo</td><td>Comissionado</td></tr>
<tr><td>UFJF</td><td>Minas Gerais</td><td>Inaugurado</td></tr>
<tr><td>UCS</td><td>Rio Grande do Sul</td><td>Em andamento</td><td>Convênio em andamento</td></tr>
</table>

Além de disseminar os conceitos de eficiência energética para otimização de sistemas motrizes industriais e fomentar atividades de pesquisa e extensão, o laboratório permite ainda, que os alunos tenham acesso ao que há de mais moderno em automação e controle industrial.

2.7 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados dois conceitos importantes: o de energia e o de eficiência energética. Entender o conceito de energia é fundamental para que se possa utilizá-la de modo adequado, a fim de se evitar seu desperdício. Do outro lado, a eficiência energética é a ferramenta que orienta o homem para o uso correto e racional da energia.

Além disso, através dos indicadores de eficiência energética, foi visto como é possível mensurar a eficiência de um processo. Ainda, foi apresentada a recente legislação brasileira sobre eficiência energética, a qual faz parte de uma das iniciativas do governo brasileiro para conter o desperdício de energia elétrica.

Por último, foi apresentado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL. Este compreende outra iniciativa do governo brasileiro em conter o desperdício de energia, através de ações voltadas principalmente para a conscientização da população (empresas públicas, privadas e instituições de ensino) no que diz respeito a mudança no seu hábito de consumo de energia. Destacou-se o subprograma Procel Indústria pelas ações

realizadas em parceria com Universidades Federais para implantação de Laboratórios de Otimização de Sistemas Motrizes, os quais fornecem aos alunos uma boa estrutura de equipamentos para realização de estudos de eficiência energética em sistemas motrizes industriais.

No próximo capítulo serão discutidos os conceitos envolvidos em sistemas de bombeamento d'água, os quais são objeto de estudo desse trabalho.

3. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

3.1 Introdução

Neste capítulo, faz-se uma descrição das características do sistema de bombeamento com a finalidade de compreender seu princípio de funcionamento.

Aborda-se, inicialmente, a determinação do diâmetro ótimo da tubulação e das perdas de carga existentes ao longo do trajeto do fluido, bem como da curva característica da instalação. Logo após, são mostradas as características de uma bomba centrífuga, destacando suas curvas características.

Por último, trata-se dos meios de aplicar os conceitos de eficiência energética em sistemas de bombeamento de água.

3.2 Instalações de Bombeamento

Segundo Macyntire (1987), a operação normal de bombeamento consiste em fornecer energia ao líquido para que este possa executar o trabalho representado pelo deslocamento do seu peso entre duas posições que se considerem, vencendo as resistências que se apresentarem em seu percurso.

Assim, uma instalação de bombeamento é responsável por proporcionar o deslocamento do fluido presente no reservatório de sucção até o reservatório de recalque, através de suas tubulações e seus acessórios (válvulas, registros, curvas), a uma dada vazão desejada. A figura 3.1 apresenta uma instalação de bombeamento simples com reservatórios, bomba e acessórios.

As principais características de uma instalação de bombeamento, considerando-se dutos de seção circular, são os diâmetros das tubulações de sucção e recalque, as perdas de carga da instalação, a curva de carga da instalação e uma bomba que garanta a vazão desejada.

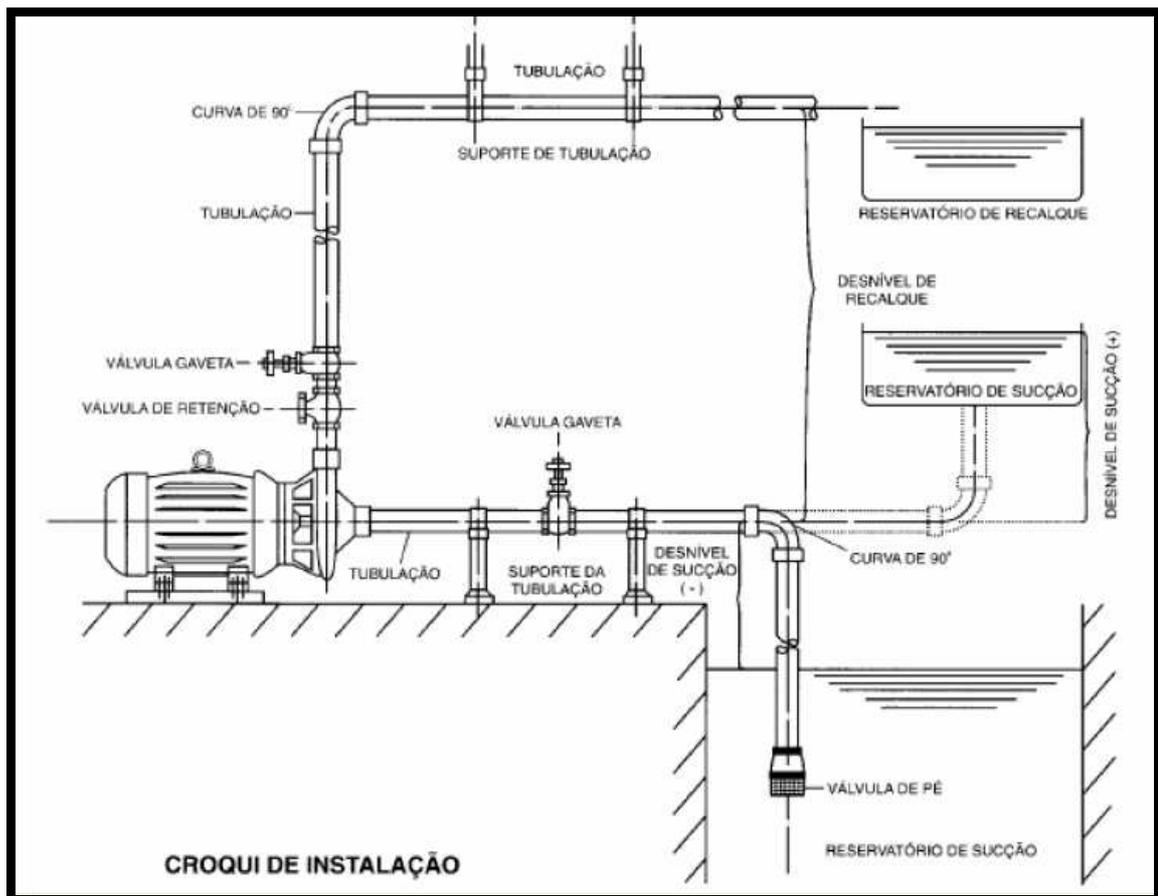



Figura 3.1 – Instalação de Bombeamento Simples

Para uma melhor compreensão dos sistemas de bombeamento serão detalhadas nos itens a seguir as características citadas anteriormente.

3.2.1 Diâmetro das Tubulações

Segundo a NBR 12214 (1992), primeira atividade na elaboração do projeto de um sistema de bombeamento é determinar da vazão desejada considerando as condições operacionais desse sistema. Esta vazão é dada, segundo a equação da continuidade, pelo produto da velocidade de escoamento do fluido pela área da secção transversal da tubulação (GAIO, 2005).

Sabe-se, pelo teorema de Bernoulli, que a velocidade do fluido é proporcional a quantidade de energia por unidade de peso necessária para o seu deslocamento. Assim, para uma mesma vazão, quanto maior o diâmetro da tubulação (para o caso de tubulações com seção transversal circular) menor a quantidade de energia a ser cedida e menor será o custo com a operação do sistema, mas seu custo de implantação será alto. Entretanto, se o diâmetro

da tubulação for relativamente pequeno, a instalação terá baixo custo de implantação, porém os custos com a operação do sistema serão maiores (SCHIMIDLIN, 2006).

Schimidlin (2006) destaca que, para a determinação do diâmetro ótimo da tubulação de recalque, recorre-se à fórmula empírica de Bresse:

$$d_R = K \times \sqrt{Q} \quad (3.1)$$

onde d_R é dado em metros, Q é a vazão dada em m³/s e K é um fator que leva em consideração variáveis econômicas, sendo 0,7 $\leq K \leq$ 1,0. Em circunstâncias onde as tubulações de recalque são operadas apenas algumas horas por dia, utiliza-se a fórmula empírica de Forchheimer:

$$d_R = 1{,}3 \times \sqrt{Q} \times \sqrt[4]{X_h} \quad (3.2)$$

onde X_h é a porcentagem de horas do dia que o sistema está em operação.

O resultado das equações fornece o valor do diâmetro comercial imediatamente superior. Para o diâmetro da tubulação de sucção, utiliza-se o diâmetro comercial imediatamente superior ao da tubulação de recalque.

3.2.2 Perdas de Carga

A perda de carga é definida por Macyntire (1987) como sendo a energia cedida pelo líquido em escoamento devido ao atrito interno entre as moléculas do fluido, atrito contra as paredes da tubulação e perturbações no escoamento.

Estas perdas apresentam-se sob duas formas distintas: perda de carga distribuída e perda de carga localizada.

3.2.2.1 – Perda de Carga Distribuída

A perda de carga distribuída é aquela que se dá ao longo das tubulações de forma contínua (GAIO, 2005).

Na literatura especializada existem diversas fórmulas para determinar a perda de carga distribuída, sendo estas estabelecidas para materiais e condições especiais que deverão se assemelhar aos casos em que se pretende aplicá-las. Segundo Gaio (2005) são duas as mais utilizadas no saneamento: a fórmula de Hazen-Williams e a fórmula de Darcy-Weisbach.

A primeira delas, empírica, é muito utilizada devido a sua praticidade. Foi desenvolvida pelos pesquisadores Hazen e Williams e sua expressão matemática é:

$$h = \frac{10,65 \times Q^{1,852} \times L}{C^{1,852} \times D^{4,87}} \quad (3.3)$$

onde h é a perda de carga distribuída, L é o comprimento em metros da tubulação, D é o diâmetro em metros e Q a vazão em m³/s que flui pela tubulação em questão.

Já o termo C corresponde à representação do estado de conservação das paredes internas da tubulação. Se estas forem muito rugosas, o atrito provocado pelo escoamento será maior, gerando uma perda de carga maior. Nesta situação o valor atribuído ao termo é baixo. Por outro lado, se as paredes internas forem lisas, o atrito será menor e, conseqüentemente, a perda de carga também. Nesta situação o valor atribuído ao termo é alto (GAIO, 2005).

A segunda expressão é racional, pois deriva de considerações físicas e matemáticas desenvolvidas por Darcy e Weisbach. Por esta razão possui uma conceituação mais precisa e, alem disso, é recomendada pela ABNT NBR 12218. Sua expressão matemática é:

$$h = \frac{8 \times F_R \times L_r}{\pi^2 \times g \times D^5} \times Q^2 \quad (3.4)$$

onde Q é a vazão em m³/s, L_r é o comprimento da tubulação em metros, D é o diâmetro da tubulação em metros, g é a aceleração da gravidade em m/s² e F_R é o fator de resistência ou coeficiente de atrito da tubulação sem unidade de medida.

O fator de resistência ou coeficiente de atrito é o parâmetro de difícil determinação se feita sem auxílio de calculadoras científicas ou de computadores pessoais. Em regime de escoamento de fluido do tipo turbulento, emprega-se a expressão de Coolebrook-White mostrada na equação:

$$\frac{1}{\sqrt{F_R}} = 0,8 \times \ln\left(\frac{\varepsilon}{3,7 \times D} + \frac{2,51}{R_e \times \sqrt{F_R}}\right) \quad (3.5)$$

onde R_e é o número de Reynolds (adimensional), ε é a rugosidade da tubulação em metros e D é o diâmetro da tubulação em metros.

Esta equação é de difícil resolução algébrica. Porém, Swamee e Jain desenvolveram uma expressão que aproxima a menos de 1% dos resultados da fórmula de Coolebrook, desde

que o número de Reynolds e a rugosidade relativa da tubulação estejam na faixa de $4{,}10^3 \leq R_e \leq 10^8$ e $10^{-6} \leq \varepsilon / D \leq 10^{-2}$. Segundo Gaio (2005), estas são as faixas onde se situam os valores usuais no saneamento. A expressão matemática de Swamee-Jain é:

$$F_R = \frac{1{,}325}{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 \times D} + \frac{5{,}74}{R_e^{0{,}9}}\right)\right]^2} \tag{3.6}$$

3.2.2.2 Perda de Carga Localizada

A perda de carga localizada ocorre quando existem pontos singulares na tubulação que provocam um atrito significativamente maior que o provocado pelo escoamento contínuo. Isto ocorre em função do choque das moléculas de água entre si e entre as paredes do tubo. Assim, parte da energia cinética da água é perdida, tal qual ocorre em todo processo de transformação de energia na natureza (GAIO, 2005).

Segundo Macintyre (1987), uma das formas de determinar a perda de carga localizada é através do método dos comprimentos equivalentes. Neste método são somados ao termo L_r ou ao termo L das equações (3.3) e (3.4), respectivamente, os comprimentos equivalentes em metros de tubulação reta e de igual diâmetro de todos os acessórios existentes no sistema. Assim, a equação (3.3) passa a ser:

$$h = \frac{10{,}65 \times Q^{1{,}852} \times (L + L_{EQ})}{C^{1{,}852} \times D^{4{,}87}} \tag{3.7}$$

e a equação (3.4) passa a ser:

$$h = \frac{8 \times F_R \times (L_r + L_{EQ})}{\pi^2 \times g \times D^5} \times Q^2 \tag{3.8}$$

Outra forma de determinar a perda de carga localizada é a recomendada pela ABNT NBR 12214 (1992). Esta forma utiliza a expressão:

$$h_S = K_S \times \frac{v^2}{2 \times g} \tag{3.9}$$

onde K_s é o coeficiente adimensional de perda de carga localizada, v é a velocidade média em m/s na seção e g é a aceleração da gravidade em m/s².

O comprimento equivalente a tubulação reta para os acessórios do sistema de bombeamento pode ser encontrado em Macintyre (1987), assim como tabelas que apresentem os valores do coeficiente de perda de carga. A ABNT NBR 12214 (1992) também apresenta tabelas completas sobre este coeficiente.

3.2.3 Curva Característica da Instalação

É usual representar em um gráfico a variação da perda de carga em função da vazão. A curva obtida a partir dessas grandezas recebe o nome de curva do sistema. Essa curva apresenta o aspecto de uma parábola, devido à vazão ser elevada ao quadrado nas fórmulas da determinação da perda de carga (1,852 na expressão de Hanzen-Williams) e também na expressão para a determinação da perda de carga localizada. Cabe ressaltar que nesta última a vazão varia diretamente com a velocidade de acordo com a equação da continuidade (GAIO, 2005).

O desenho da curva do sistema é obtido através da expressão utilizada para determinar a altura manométrica, a qual é dada por:

$$HMT = H_G + h_t \quad (3.10)$$

onde H_G é a altura estática ou desnível geométrico e h_t é a perda de carga total. A altura estática representa a altura em que se deve bombear o liquido. Em termos exatos é a diferença de cotas entre a superfície livre de água do reservatório de recalque e a superfície livre de água do reservatório de sucção. Já a altura manométrica é a necessária para vencer tanto a altura geométrica quanto as perdas de carga que ocorrem na tubulação.

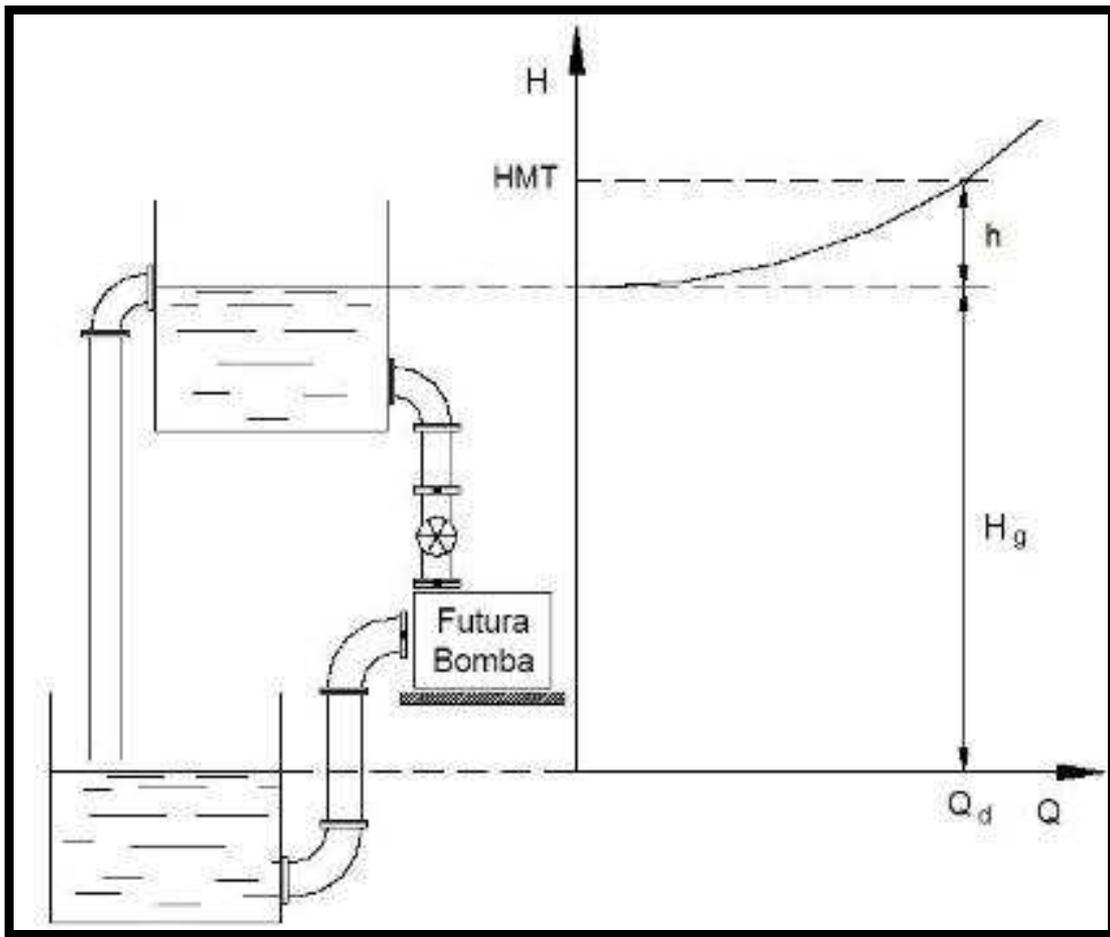



Figura 3.2 – Curva do sistema

3.3 Bomba de Fluxo

De acordo com Haddad (2006), as bombas de fluxo são máquinas nas quais a movimentação do líquido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em conseqüência da rotação de rotor com um numero de pás especiais.

A distinção entre os diversos tipos de bombas de fluxo é feita, fundamentalmente, em função da forma como o rotor cede energia ao líquido, bem como pela orientação do líquido ao passar pelo rotor.

A norma NBR 10131 (1987) classifica as bombas hidráulicas de fluxo da seguinte maneira:

a) De acordo com a forma do rotor, conforme a figura 3.3:

- Centrifugas ou Radiais: O formato do rotor impõe um escoamento segundo planos perpendiculares ao eixo, operando em pequenas vazões e grandes alturas.

- Fluxo Misto: O formato do rotor impõe um escoamento simultaneamente nas direções axial e perpendicular ao eixo, operando em médias vazões e médias alturas.

- Axiais: O formato do rotor impõe um escoamento predominantemente na direção paralela ao eixo, operando em grandes vazões e pequenas alturas.

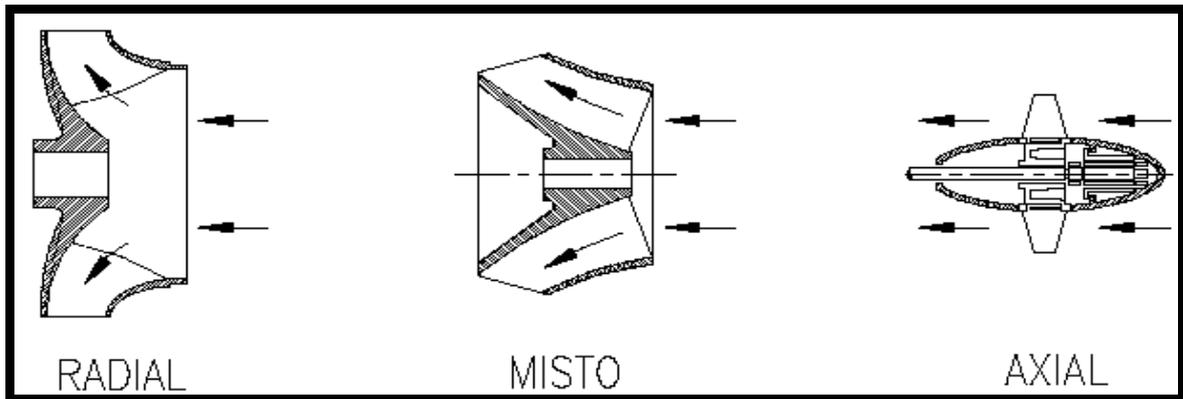



Figura 3.3 – Rotores radial, misto e axial (HADDAD, 2006).

b) De acordo com o modo de entrada do líquido no rotor, conforme a figura 3.4:

- Simples Sucção: Apresenta a entrada do liquido em um lado do rotor.

- Dupla Sucção: Apresenta a entrada do líquido nos dois lados do rotor, possuindo a função de dobrar a vazão para mesma pressão.

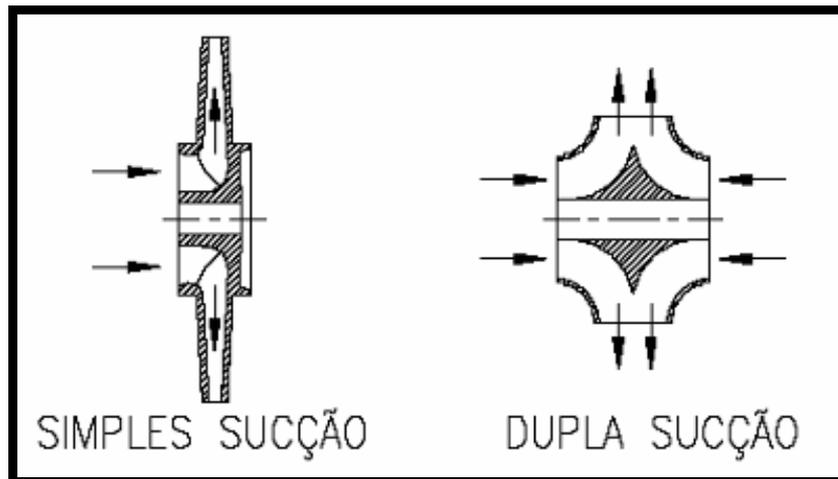



Figura 3.4 – Rotores radiais de simples sucção e dupla sucção (HADDAD, 2006).

c) De acordo com o número de rotores em uma mesma carcaça, conforme a figura 3.5:

- Um Estágio: A bomba possui apenas um rotor.

• Vários Estágios: A bomba possui mais de um rotor e aumenta a pressão para mesma vazão.

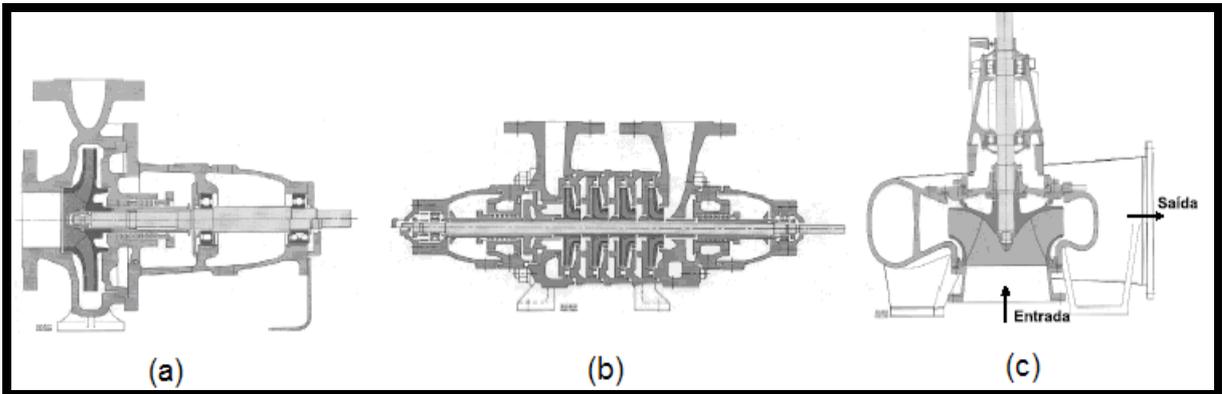



Figura 3.5 – (a) Bomba radial, simples sucção, um estágio e eixo horizontal.
(b) Bomba radial, simples sucção, quatro estágios e eixo horizontal.
(c) Bomba de eixo vertical, rotor radial e um estágio.

d) De acordo com a posição da bomba, conforme a figura 3.5:

• Eixo Horizontal: Operando com a bomba emersa.

• Eixo Vertical: De eixo prolongado, operando com a bomba submersa.

e) De acordo com a posição do eixo da bomba em relação ao nível da água, conforme a figura 3.6:

• Bomba de Sucção Positiva: Quando o eixo da bomba localiza-se acima do nível do reservatório.

• Bomba de Sucção Negativa (“Afogada”): Quando o eixo da bomba localiza-se abaixo do nível do reservatório.

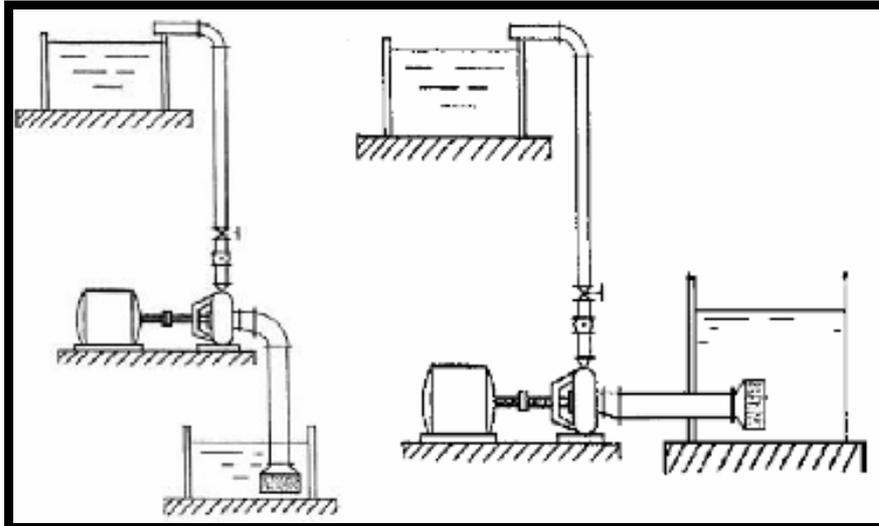



Figura 3.6 - Classificação das bombas com relação à posição do eixo em relação ao nível d'água (HADDAD, 2006).

f) De acordo com a posição das pás no rotor, conforme a figura 3.7:

- Rotor Fechado: Apresenta dois discos, o traseiro e o dianteiro.
- Rotor Semi-aberto: Apresenta somente um disco, onde são fixadas as pás.
- Rotor Aberto: Não apresenta nenhum disco, e as pás são fixadas no cubo do mesmo.

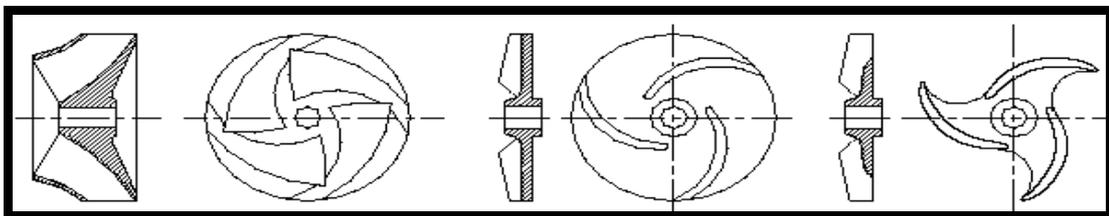



Figura 3.7 – Rotores fechado, aberto e semi-aberto (HADDAD, 2006).

3.3.1 Bombas Centrífugas

Como visto na seção anterior, as bombas centrífugas produzem escoamento ortogonal do líquido em relação ao eixo delas. Dessa forma, essas bombas podem ser entendidas como fontes de pressão, pois geram uma pressão negativa na sua entrada, capaz de sugar o líquido do reservatório de origem e geram uma pressão positiva na sua saída, capaz de impulsionar o líquido até o reservatório de destino (SCHMIDLIN, 2006).

Para Gaio (2005), a seleção da bomba deve utilizar dois critérios: o primeiro é a determinação da vazão e da altura manométrica total requerida e, o segundo, é a escolha da

bomba de menor potência que satisfaça os valores obtidos no primeiro critério, ou seja, a bomba mais eficiente e de melhor rendimento.

Desataca-se, ainda, no contexto da escolha da bomba, sua rotação específica. Esta é uma grandeza que define a geometria ou o tipo de rotor da bomba mais adequado. É dada pela expressão:

$$n_q = n_b \times \sqrt[4]{\frac{Q^2}{H^3}} \quad (3.11)$$

onde Q é a vazão em m³/s, H é a altura manométrica correspondente a Q e n_b é a rotação nominal da bomba em rpm.

A potência mecânica da bomba é obtida pela expressão:

$$P_{mec} = \gamma \times Q \times HMT \quad (3.12)$$

onde γ é o peso específico do fluido, Q é a vazão e HMT é a altura manométrica.

3.3.2 Curvas de Desempenho das Bombas Centrífugas

As características de desempenho das bombas centrífugas são representadas por curvas fornecidas pelos fabricantes. Elas traduzem o desempenho esperado de cada bomba.

São, basicamente, quatro as curvas características tradicionais:

- Curva de Carga x Vazão;
- Curva de Potência Absorvida x Vazão;
- Curva de Rendimento x Vazão;
- Curva NPSH x Vazão, que traduz o NPSH requerido pela bomba, o qual deve ser comparado ao NPSH disponível do sistema;

3.3.2.1 Curva Altura x Vazão

Obtida a partir dos ensaios de pressão e vazão da bomba. Embora seja, teoricamente, uma parábola, devem-se descontar os efeitos do atrito, que mudam a curva teórica.

Representa a relação entre a vazão que a bomba é capaz de recalcar e a altura manométrica total “contra” a qual essa vazão pode ser recalcada. O ponto de funcionamento

dessa bomba em um determinado sistema é dado pelo cruzamento da curva do sistema com a curva da bomba. É importante notar que a curva da bomba nada tem a ver com a curva do sistema. Ela é uma característica da bomba, assim como a curva do sistema nada tem a ver com a curva da bomba. É uma característica da hidráulica do sistema de tubulações, reservatórios e cotas dos níveis de água de onde e para onde se quer recalcar. O aspecto da curva da bomba é apresentado na figura 3.8:

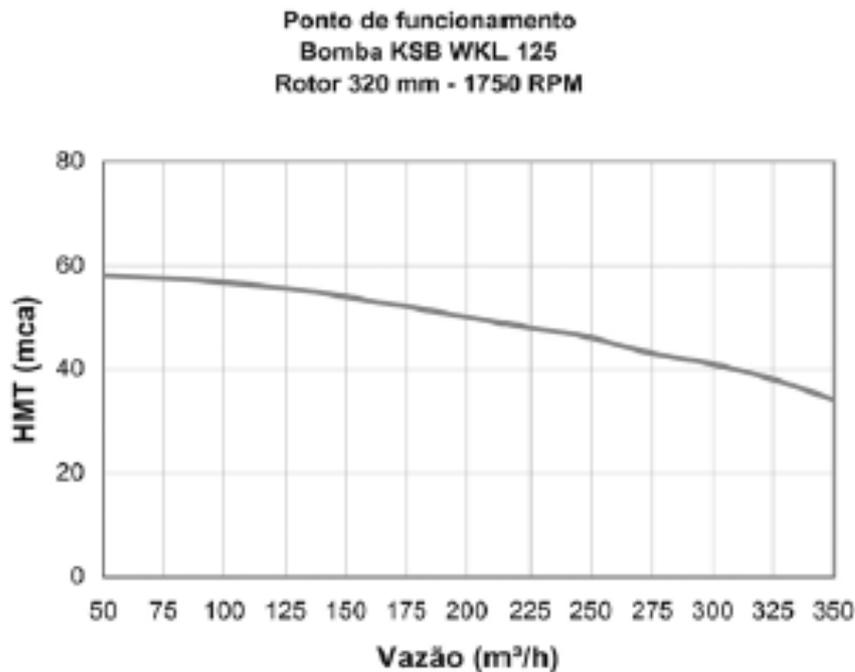



Figura 3.8 – Curva da bomba KSB WKL 125 (GAIO; MONTEIRO, 2005).

3.3.2.2 Curva Potência x Vazão

Obtida dos ensaios no laboratório de hidráulica do fabricante. Representa a relação entre a vazão bombeada e a potência necessária para tal vazão. Aqui, vale uma observação sobre essa potência: ela é denominada usualmente de BHP (*Brake Horse Power*, do inglês) e quer dizer a potência hidráulica absorvida pela bomba. É a potência que o motor deve fornecer ao eixo da bomba. Não é a potência que é demandada da concessionária de energia elétrica. Essa é o resultado da divisão da potência dada pelo catálogo do fabricante (BHP) pelo rendimento do motor e pelo fator de potência da instalação. Seu aspecto é apresentado na Figura 3.9.

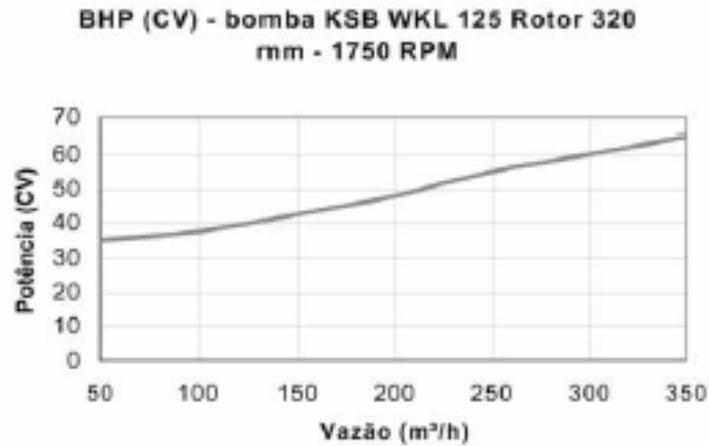



Figura 3.9 – Curva Potência x Vazão (GAIO; MONTEIRO, 2005).

3.3.2.3 Curva Rendimento x Vazão

É a curva que mostra a "região" do intervalo de vazões possível para a bomba, onde se dá o melhor rendimento (máximo da curva) e seu valor. O aspecto das curvas de rendimento x vazão é o mostrado na Figura 3.10.

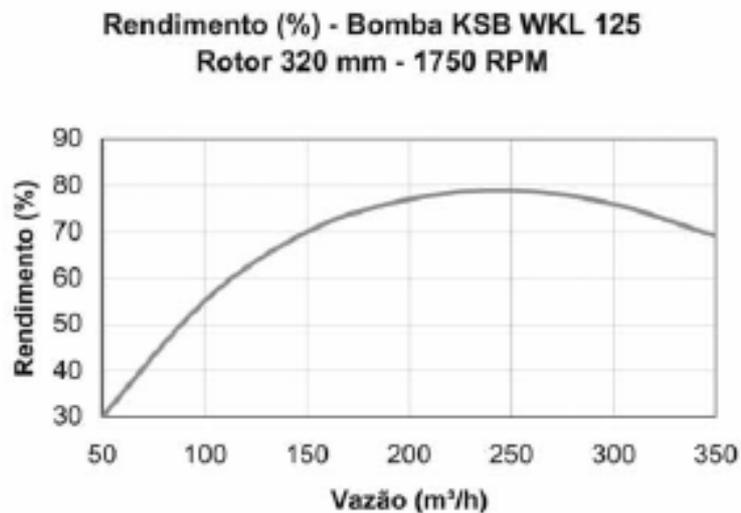



Figura 3.10 – Curva rendimento x vazão (GAIO; MONTEIRO, 2005).

3.3.2.4 Curva NPSH x Vazão

Outra curva que caracteriza as bombas centrífugas é a que relaciona o NPSH requerido com a vazão, sendo o NPSH (*NET POSITIVE SUCTION HEAD*) a carga requerida na entrada do rotor. Como representa uma "carga", possui unidades métricas (metros de coluna de água, m.c.a). A curva tem o aspecto da Figura 3.11.

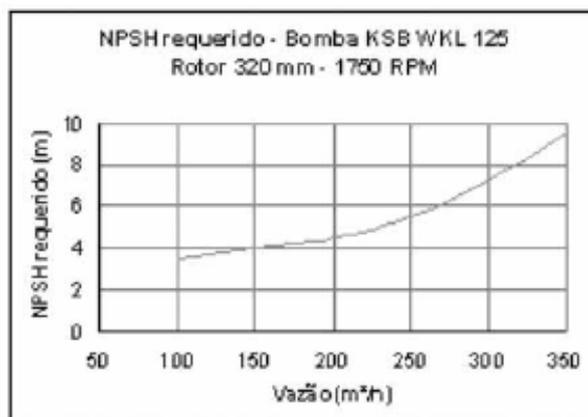



Figura 3.11 – Curva NPSH x Vazão (GAIO; MONTEIRO, 2005).

3.3.3 Variação das Curvas Características

Durante o ciclo diário de funcionamento de um sistema de bombeamento de água ocorrem variações que modificam as curvas características desse sistema. Estas curvas são modificadas em seus pontos de operação.

O ponto de operação de uma curva característica é aquele de melhor funcionamento para uma determinada vazão, carga total e rotação, em que suas perdas inerentes do melhor escoamento são mínimas (HADDAD, 2006). Pode-se dizer que este é o ponto onde a carga gerada pela bomba é igual à carga requerida pelo sistema, conforme apresentado na figura 3.12.

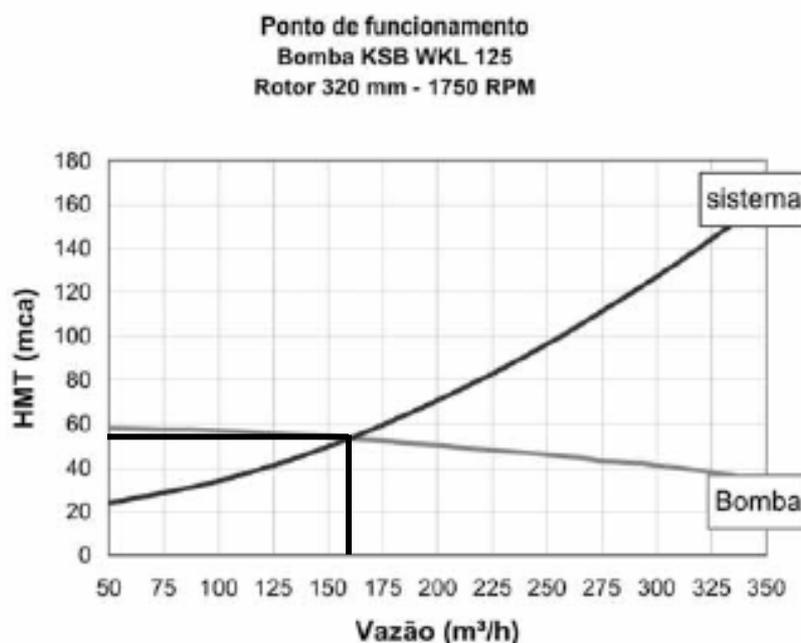



Figura 3.12 – Ponto de Operação (GAIO; MONTEIRO, 2005).

Atribuindo-se o ponto de operação mostrado na figura 3.12 as curvas das figuras 3.8, 3.9 e 3.10, pode-se determinar as demais características de operação da bomba centrífuga: potencia mecânica e rendimento.

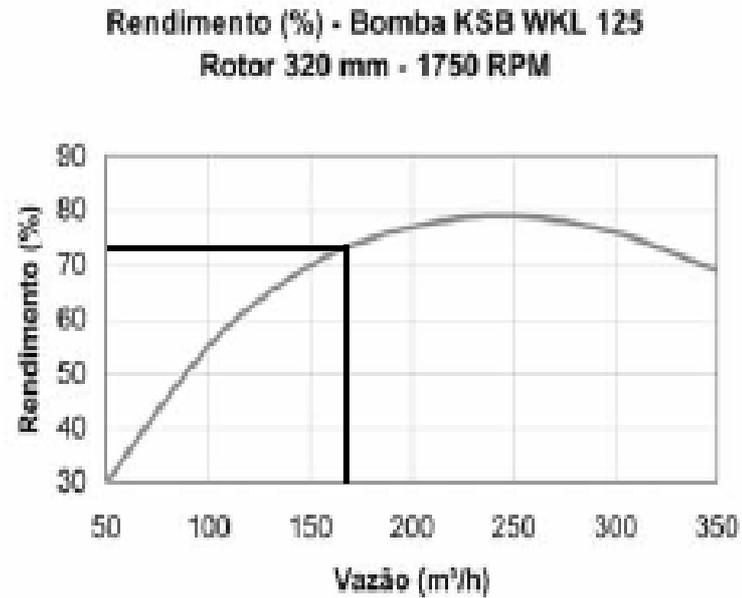



Figura 3.13 – Rendimento no ponto de operação (GAIO; MONTEIRO, 2005).

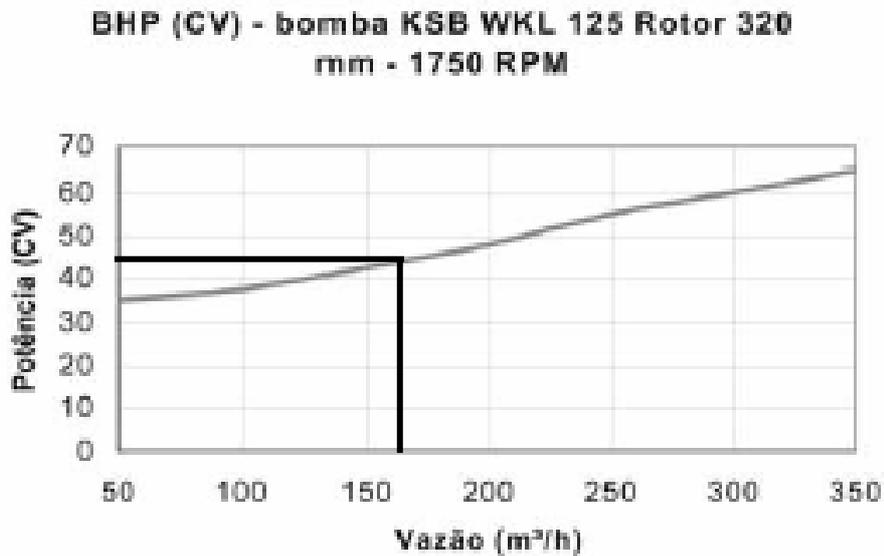



Figura 3.14 - Potência no ponto de operação (GAIO; MONTEIRO, 2005).

A forma mais usual de variar o ponto de operação da curva da instalação é através do método de estrangulamento da tubulação por meio de uma válvula. Este método é baseado na inserção ou retirada de perdas de carga localizadas em uma válvula decorrente de sua abertura ou fechamento. A figura 3.15 mostra como a alteração da curva da instalação, através da

inserção de perdas de carga ($H_2 > H_1$), altera o ponto de operação, que vai de (Q_1; H_1) para (Q_2; H_2), obtendo a redução de vazão desejada ($Q_2 < Q_1$).

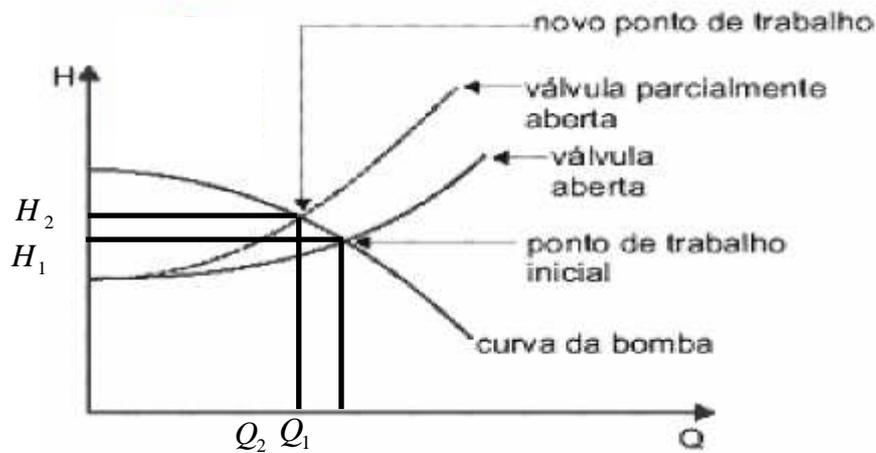



Figura 3.15 - Ajuste de vazão por estrangulamento de válvula

A variação da curva característica da bomba pode ser obtida em função da variação do diâmetro do rotor e em função da variação da velocidade da rotação.

A variação do diâmetro do rotor apresenta o inconveniente de não poder ser realizada com o sistema em operação, pois é necessária a troca do rotor da bomba e, algumas vezes, até do motor. Além disso, permite que somente algumas curvas de carga sejam alcançadas, por limitações físicas da carcaça da bomba.

Em contrapartida, a variação da velocidade de rotação além de não precisar de parada do sistema, permite que a curva da bomba seja alterada a uma faixa maior de valores. Ainda, este método apresenta a vantagem de garantir uma acentuada redução da potência necessária pra o acionamento da bomba.

Uma forma de facilitar a percepção das variações dos parâmetros característicos das bombas centrífugas radiais a partir da variação da rotação, além de permitir o uso das curvas fornecidas pelos fabricantes, é utilizarem-se as chamadas relações de Rateaux ou leis de afinidade, que são dadas (para bombas centrífugas com o diâmetro do rotor fixo) pelas equações:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \tag{3.13}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \tag{3.14}$$

$$\frac{P_{mec1}}{P_{mec2}} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3 \tag{3.15}$$

Se forem aplicadas as equações (3.11) e (3.12) a cada ponto da curva de carga da bomba à rotação ω_1 é obtida a curva para a velocidade ω_2. A Figura 3.16 mostra como a variação da velocidade altera o ponto de operação, que vai de (Qt_1; H_1) para (Qt_2; H_2), obtendo a redução de vazão desejada ($Qt_2 < Qt_1$). Em acréscimo, observa-se uma redução na carga ($H_2 < H_1$).

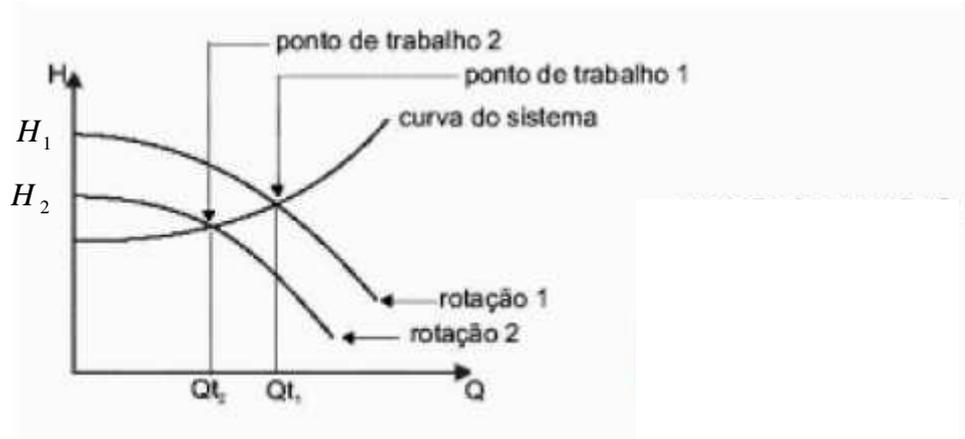



Figura 3.16 – Variação da velocidade na curva da bomba.

3.4 Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento

Existem, basicamente, duas formas de se promover eficiência energética em sistemas de bombeamento. A primeira delas consiste em utilizar instalações hidráulicas adequadas. Já a segunda consiste em evitar ou reduzir o consumo de energia elétrica, principalmente no horário de ponta.

Para tanto se torna necessário identificar as perdas que reduzem a eficiência do referido sistema. Uma análise no balanço energético do sistema fornece um ponto de partida para reconhecer as oportunidades de melhoria na eficiência. A figura 3.17 apresenta um balanço de energia característico, com as perdas de um sistema de bombeamento.

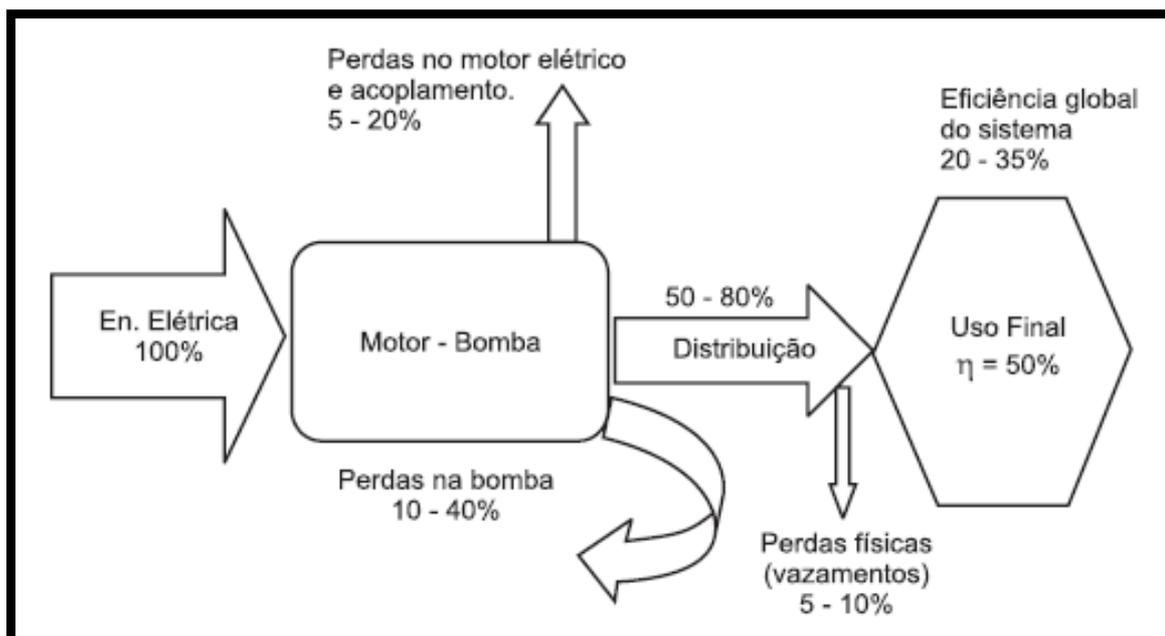



Figura 3.17 – Diagrama de balanço de energia com as perdas do sistema (GAIO; MONTEIRO, 2005).

A seguir serão descritas as oportunidades de promover eficiência energética em sistemas de bombeamento.

3.4.1 Oportunidades de Economia

De modo geral, muitas são as oportunidades para melhorar a eficiência de sistema de bombeamento. Estas oportunidades podem ser classificadas de acordo com a parte do sistema na qual são implementadas. A tabela 3.7 apresenta as partes do sistema passíveis de ações de eficiência bem como o percentual de energia que pode ser economizado.

Tabela 3.1 – Oportunidades de economia (GAIO; MONTEIRO 2005).

ÁREAS PARA MELHORIA	ENERGIA ECONOMIZADA
Uso final da água	Até 70%
Redução de vazamentos	15%
Melhoria da rugosidade	15%
Melhoria do rendimento do motor	5%
Melhoria do rendimento da bomba	5%
Variadores de velocidade	27%

Vale ressaltar que, ao se estudar ou planejar uma medida de eficientização em uma parte do sistema, os impactos nas demais partes devem ser avaliados, bem como as

conseqüências sobre outros parâmetros, como mão de obra, outros insumos e manutenção. Esses impactos devem ser quantificados e considerados nas avaliações econômicas.

3.4.1.1 Uso Final de Água

O uso final representa o conjunto de consumidores de água. É o ponto final do sistema de bombeamento, sobre o qual o operador do sistema não tem controle. O dimensionamento de todo sistema de abastecimento, bem como do consumo de energia, é dado pela demanda por água (GAIO; MONTEIRO 2005).

A água é usada para diversos fins. A iniciativa para o uso adequado e eficiente deve partir do questionamento da necessidade real daquela utilização. Se menor for o desperdício de água em seu uso final, menores serão os custos para levá-la até o consumidor.

Desse modo, algumas medidas podem ser adotadas para redução do uso final de água:

- Promover campanhas educativas com orientações sobre procedimentos adequados, processos ou equipamentos alternativos, para reduzir o tempo de uso e/ou a quantidade usada.
- Promover a compatibilização do uso com a qualidade da água, incentivando a reciclagem ou reaproveitamento.
- Incentivar a captação de água pluvial e seu uso em substituição à água beneficiada.
- Realizar programas e projetos que visem a redução do consumo próprio de água, gerando menos esgoto.

3.4.1.2 Redução de Vazamentos

Em sistemas de bombeamento a redução da perda de água implica em redução do consumo de energia elétrica. O cruzamento das informações do volume disponibilizado com a somatória dos volumes apurados nos medidores permite conhecer o valor dessa perda. No entanto, deve ser observado que nem toda perda é física, isto é, pode ser traduzida como vazamento ou consumo próprio. Uma parte importante deve-se à imprecisão dos próprios medidores taquimétricos (GAIO; MONTEIRO 2005).

Neste caso, algumas medidas podem ser adotadas:

- Fazer a automação e o controle da rede, visando detectar mais rapidamente as perdas e providenciar sua correção.

- Promover campanha de aferição de medidores.

- Realizar pesquisas de vazamentos de forma planejada e freqüente.

3.4.1.3 Melhoria da Rugosidade da Tubulação

A rugosidade interna, ou o estado de conservação da tubulação, influencia a perda de carga distribuída na altura manométrica total. Quanto maior a rugosidade, maiores as perdas e o consumo de energia para o transporte da água. Os materiais que constituem a tubulação influenciam a rugosidade.

Em linhas gerais, podem-se separar os tubos em: metálicos e não-metálicos. Os primeiros (aço, aço galvanizado e ferro fundido) são utilizados quando se trabalha com pressões maiores ou quando se trabalha com diâmetros de maior dimensão (caso do aço). Os tubos de aço não apresentam revestimento interno enquanto que as tubulações de ferro fundido são cimentadas internamente.

As tubulações não-metálicas, normalmente, não têm qualquer revestimento, uma vez que a característica construtiva do material (bastante liso) já lhes confere uma baixa resistência ao escoamento e conseqüentemente baixo atrito.

É importante observar que a melhoria da rugosidade da tubulação aplica-se, com melhores resultados, na etapa de projeto do sistema onde é possível estimar a influência do material na perda de carga da tubulação, uma vez que após a implantação do mesmo torna-se difícil promover a sua substituição.

3.4.1.4 Melhoria do Rendimento do Motor e da Bomba

Ao se tratar de otimização energética, o ponto principal a ser abordado é a potência dos motores. No caso dos sistemas de bombeamento de água, incide-se uma preocupação adicional a bomba d’água pelo fato de o modo de funcionamento do conjunto motor-bomba gerar consumo de energia elétrica e demanda da rede de distribuição (GAIO; MONTEIRO 2005).

A expressão para o cálculo da potência elétrica necessária para o funcionamento de uma bomba centrífuga é:

$$P_{el} = \frac{\gamma \times Q \times HMT}{\eta_b \times \eta_m} \tag{3.15}$$

onde γ é o peso específico do fluido, Q é a vazão, HMT é a altura manométrica total, η_b é o rendimento da bomba e η_m o rendimento do motor.

A partir da equação (3.15), verificam-se cinco elementos que interferem no cálculo da potência elétrica, sendo que os rendimentos da bomba e do motor influem de forma inversamente proporcional. Este fato ressalta a importância de escolher um conjunto motor-bomba com rendimentos adequados a instalação projetada.

Desse modo, a utilização de motores de alto rendimento, que embora sejam mais caros, eventualmente pode compensar o investimento inicial com menor custo operacional. Isto dependerá do tempo de funcionamento diário previsto ao longo da vida útil do equipamento ou do alcance do projeto.

Motores rebobinados tendem a perder rendimento. Assim, comparando a eficiência entre os tipos de motores (novo padrão, novo alto rendimento ou rebobinado) é possível verificar se a economia no investimento para rebobiná-lo não será compensada pelo maior custo operacional.

3.4.1.5 Variadores de Velocidade

Nos sistemas de bombeamento, o ponto de funcionamento da bomba varia ao longo da sua curva, de acordo com a variação da curva do sistema. Esta última curva varia com a perda de carga, aumentando ou diminuindo conforme a demanda se reduz ou tende ao máximo, respectivamente.

Conseqüentemente, o rendimento da bomba estará variando também, ora para melhor, ora para pior, dependendo do ponto de funcionamento do sistema.

Assim, a eficiência energética pode ser buscada procurando-se manter o rendimento o mais próximo possível do PMR (Ponto de Máximo Rendimento), variando a curva de desempenho da bomba por meio da variação da sua rotação (velocidade) para compensar a variação da curva do sistema. Este equacionamento se faz utilizando as leis de similaridades, equações (3.13), (3.14) e (3.15), que relacionam a rotação com a vazão, com a altura manométrica e com a potência mecânica (GAIO; MONTEIRO 2005).

3.4.2 Indicadores de Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento de Água

Usualmente utilizam-se os seguintes indicadores de eficiência energética em sistemas de bombeamento: custo unitário da energia adquirida da concessionária, também chamado de custo específico, e o consumo específico que relaciona a energia consumida com o volume de água bombeado.

O primeiro, normalmente formulado como R$/MWh (reais por megawatt hora), tem por finalidade aferir com que eficiência a empresa/serviço está adquirindo energia. Serve ainda, para aferir se as contratações de demanda estão sendo feitas de forma racional.

O segundo costuma ser expresso como kWh/m³ (quilowatt hora por metro cúbico bombeado, ou metro cúbico produzido, ou, em alguns casos, por metro cúbico faturado), com o qual se mede o desempenho dos equipamentos de bombeamento do sistema em termos de rendimento, além da concepção do próprio sistema. Valores elevados desse indicador podem significar perdas de carga excessivas nas linhas de recalque ou má concepção de zonas de pressão (excesso de bombeamentos), dentre outras possibilidades.

Embora muito útil no acompanhamento em séries temporais de um determinado sistema, presta-se pouco à comparação entre sistemas de características físicas diferentes, pois em casos de grandes alturas de recalque por insuficiência de mananciais em cotas favoráveis não há como o indicador apresentar valor inferior a outro sistema em que as alturas sejam menores.

Ainda são utilizados o kWh/m³ de esgoto tratado e o fator de carga. É comum também haver uma análise sistemática por parte das unidades de controle operacional das companhias de saneamento ou dos serviços municipais, do fator de potência, de modo a evitar custos com energia reativa.

3.5 Conclusão

Neste capítulo foram discutidos conceitos importantes para a elaboração do ensaio piloto. Foi visto que a ação de bombeamento de um fluido pode ser definida como o efeito de adicionar energia a este fluido para movê-lo de um ponto a outro, permitindo que o mesmo execute um trabalho, ou seja, fluindo através de uma tubulação ou atingindo um ponto com a cota mais elevada. Este efeito é obtido através das bombas que são máquinas operatrizes hidráulicas.

Foi visto também que a perda de carga é provocada em função do atrito das moléculas da água com a tubulação interna, sendo que esta pode se originar em um acessório da tubulação ou ao longo da mesma por ação do escoamento do fluido. Este é um fator fundamental para o cálculo da altura manométrica do sistema hidráulico, a qual representa a carga do referido sistema. Ainda, foram apresentadas as características das bombas hidráulicas e o significado de suas curvas.

Por último, discutiu-se a eficiência energética aplicada aos sistemas de bombeamento d’água. Algumas características como o diâmetro e o material da tubulação e o rendimento do conjunto moto-bomba podem reduzir consideravelmente o consumo de energia elétrica decorrente da operação do sistema.

No próximo capítulo serão apresentados o protótipo de bombeamento d’água do LAMOTRIZ, bem os dispositivos que o compõe, além do projeto do *software* que permitirá o acionamento e monitoramento do referido protótipo.

4. ARQUITETURA DO LABORATÓRIO REMOTO

4.1 Introdução

Neste capítulo será descrito o protótipo do Sistema de Bombeamento D'água, bem como dos equipamentos de controle e medição utilizados. Este protótipo foi doado a Universidade Federal do Pará através do programa Procel Indústria, por meio de um convênio firmado entre a Eletrobrás e a referida universidade.

Além do protótipo, será descrito o projeto do software desenvolvido para permitir a interação do usuário com o processo de bombeamento d'água.

Por último, descreve-se o ensaio realizado com objetivo de comparar a eficiência energética entre o método de ajuste de vazão por válvula de estrangulamento e o método de ajuste de vazão pela variação de velocidade do motor elétrico.

4.2 Descrição dos Equipamentos

O protótipo é composto por dois reservatórios de água, um motor de indução trifásico, uma bomba centrífuga, registro globo, registros de esfera, válvulas solenóides, válvula de controle, transmissor de pressão, transmissor de nível e medidor de vazão. A relação completa dos equipamentos é mostrada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Descrição dos equipamentos da bancada.

Sigla	Significado		Sigla	Significado
B	Bomba d'água		SNS1	Sensor de Nível 1
CLP	Controlador Lógico Programável		SNS2	Sensor de Nível 2
IF	Inversor de Freqüência		SNUS	Sensor de Nível Ultrassônico
MT	Medidor de Fluxo		VCA	Válvula de Controle Automatizado
M	Motor Elétrico		VCM	Válvula de Controle Manual
P1	Sensor de Pressão 1		VG	Válvula Globo
P2	Sensor de Pressão 2		VR	Válvula de Retenção
RI	Reservatório Inferior		VS1	Válvula Solenóide 1
RS	Reservatório Superior		VS2	Válvula Solenóide 2

A figura 4.1 descreve, por meio de um diagrama esquemático, a configuração dos equipamentos no protótipo e a figura 4.2 apresenta uma foto do mesmo.

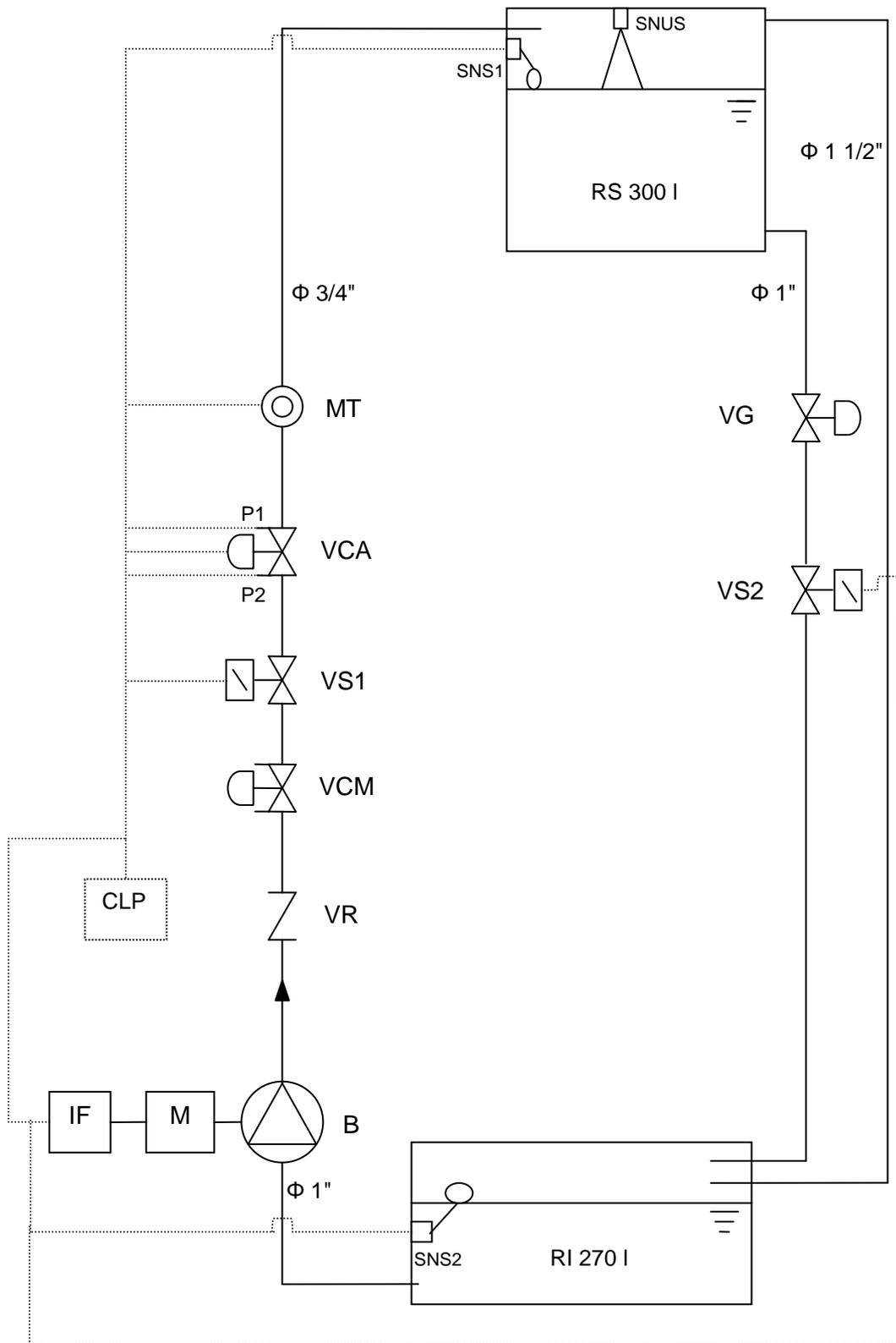



Figura 4.1 – Diagrama esquemático dos equipamentos.

O reservatório inferior possui capacidade para 270 litros, enquanto que o superior possui capacidade para 300 litros. Isto foi considerado como uma medida de segurança para evitar o transbordo do reservatório superior.

Figura 4.2 – Protótipo de bombeamento d’água.

4.2.1 Motor de Indução Trifásico

O motor elétrico utilizado é o de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo da marca WEG Indústrias SA, tipo Alto Rendimento Plus, sendo suas principais características apresentadas na tabela 4.2. Por sua vez, a figura 4.3 apresenta o motor.

Tabela 4.2 – Principais características do motor de indução trifásico.

Potência		Tensão (V)		Corrente (A)		FP	η	Cat.	Rotação (RPM)
CV	KW	Δ	Y	Δ	Y	0,87	0,83	N	3400
1,5	1,1	220	380	4,00	2,32				

Figura 4.3 – Motor elétrico de indução trifásico.

4.2.2 Conversor de Freqüência Trifásico

Para a variação de velocidade do motor elétrico citado anteriormente utiliza-se um conversor de freqüência modelo Micromaster 420, de fabricação da SIEMENS. Este equipamento é controlado por microprocessador e utiliza tecnologia IGBT (Transistor Bipolar de *Gate* Isolado).

4.2.3 Bomba Centrífuga

A bomba centrífuga utilizada é da marca KSB, modelo Meganorm 25-150. É de execução horizontal, estágio único, de sucção simples horizontal e recalque na posição vertical para cima. Os diâmetros de sucção e recalque são iguais a 1” e o do rotor igual a 150 mm. A figura 4.4 apresenta a foto da bomba.

Figura 4.4 – Bomba centrífuga KSB Meganorm 25-150.

A figura 4.5 apresenta a curva de carga da referida bomba. Conforme visto no capítulo anterior, esta curva representa a relação entre a vazão que a bomba é capaz de recalcar e a altura manométrica total “contra” a qual essa vazão pode ser recalcada.

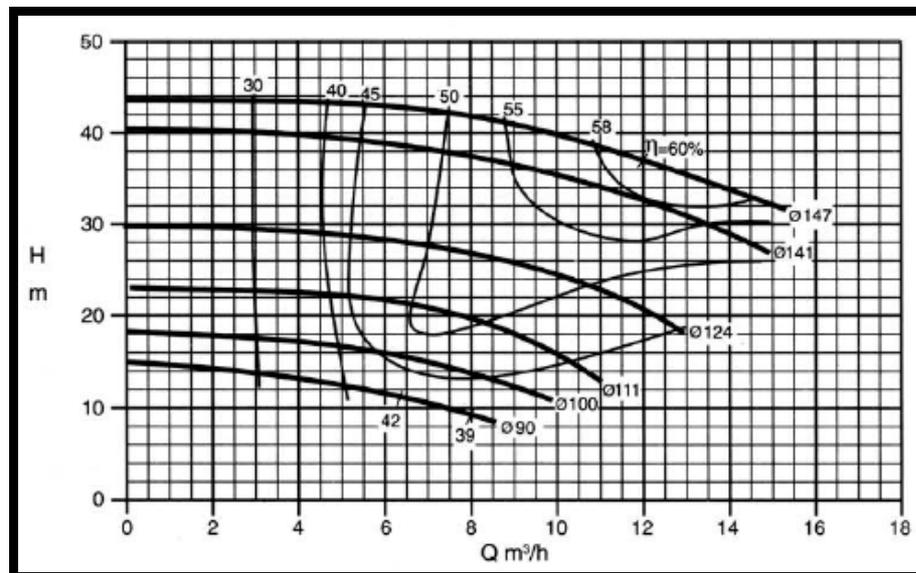



Figura 4.5 – Curva Altura x Vazão da bomba KSB Meganorm 25-150.

A figura 4.6 apresenta a curva do NPSH da referida bomba. O NPSH representa a carga requerida na entrada do rotor, sendo um parâmetro importante para se evitar a cavitação.

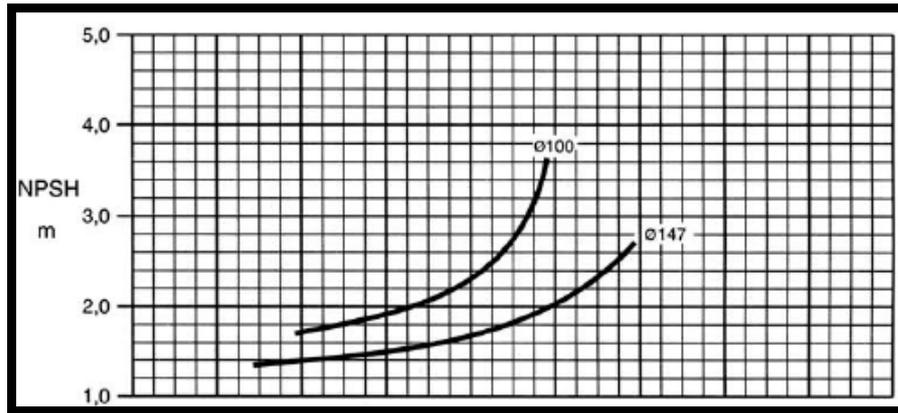



Figura 4.6 – Curva do NPSH x Vazão da bomba KSB Meganorm 25-150.

A figura 4.7 apresenta a curva da potência da referida bomba. Esta representa a relação entre a vazão bombeada e a potência necessária para tal vazão, ou seja, a potência que o motor deve fornecer ao eixo da bomba.

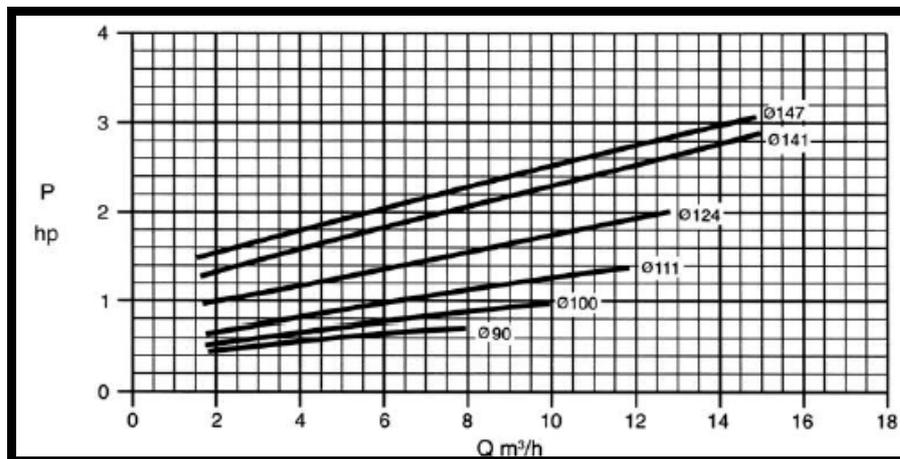



Figura 4.7 – Curva da Potência x Vazão da bomba KSB Meganorm 25-150.

4.2.4 Instalação de Bombeamento

De forma a reduzir as perdas de carga na instalação e conseqüentemente permitir que fossem alcançadas vazões da ordem de 3 m³/h, optou-se por adotar um diâmetro para a tubulação de recalque de 3/4”. Por sua vez, o diâmetro da tubulação de sucção é igual a 1”.

4.2.5 Válvula Proporcional

De forma a automatizar o ajuste de vazão utiliza-se uma válvula proporcional equipada com atuador, ambos da marca KMC Controls, modelo VEP-45 e mostrada na Figura 4.8.

A válvula é do tipo esfera com dois estágios. O atuador é alimentado com tensão de 24V (contínua ou alternada) e controlado por sinais contínuos do tipo 2-10V ou 4-20mA sendo, no segundo caso, requerido a inserção de um resistor de 500 Ω.

Figura 4.8 – Válvula proporcional VEP-45 KMC Controls

4.2.6 Transdutor de Pressão

Para a medição da carga transferida da bomba ao fluido, utilizam-se dois transdutores de pressão piezoelétrico, fabricados pela SIEMENS, modelo SITRANS P DS III. Estes equipamentos encontram-se instalados antes e depois da válvula proporcional.

Estes sensores operam com fluidos a temperaturas de -20 a 100oC, são alimentados com tensões contínuas de no máximo 30 V, geram sinais de saída com correntes contínuas que vão de 4 a 20mA e apresentam precisão de ±0,75%. A figura 4.9 apresenta o transdutor de pressão.

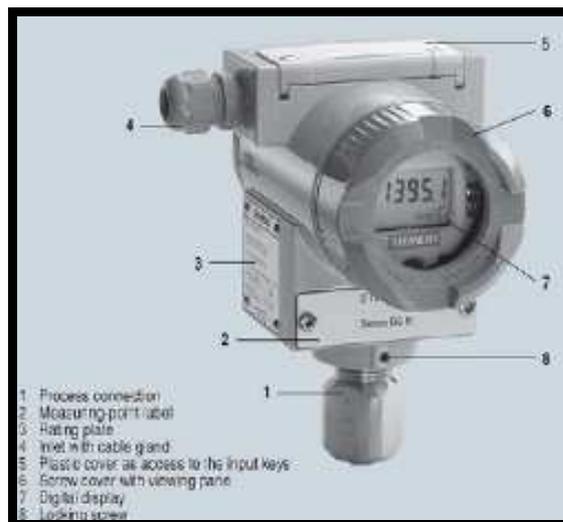



Figura 4.9 – Medidor de pressão SIEMENS SITRANS P DS III

4.2.7 Sensor de Vazão

Utiliza-se um sensor de vazão da marca SIEMENS, modelo SITRANS F M MAGFLO 5000. Este equipamento pode operar em temperaturas entre -20°C e 50 °C, possui precisão de ±0,5% e sua alimentação é provida por tensões contínuas de 12V a 24V. A figura 4.10 apresenta o sensor.

Figura 4.10 – Sensor de vazão SIEMENS SITRANS F M MEGAFLO 5000

4.2.8 Sensor de Nível

O sensor de nível utilizado é da marca SIEMENS, modelo SONAR BERO (3RG6113-3BF00). Este dispositivo possui uma faixa de sensibilidade entre 20 cm e 130 cm, alimentado por tensão contínua de 12V a 30V, possui freqüência de ultrasom de 200 KHz podendo operar em ambientes com temperatura entre -20°C e 70°C. A figura 4.11 mostra o referido dispositivo.

Figura 4.11 – Sensor de nível SIEMENS SONAR BERO

4.2.9 Central de Medidas

O monitoramento das grandezas elétricas é realizado por um multimedidor digital MID 144, de fabricação da SIEMENS mostrado na figura 4.12. Este equipamento apresenta capacidade de indicação e medição de 40 variáveis elétricas, conexão RS485 e protocolo de comunicação PROFIBUS.

Além disso, apresenta precisão de 0,2% para corrente, tensão, potência ativa e potência reativa, 0,5% para fator de potência e 1% para energia.

Figura 4.12 – Multimedidor digital SIEMENS MID-144

4.2.10 Controlador Lógico Programável

O controlador lógico programável utilizado no protótipo é um SIMATIC S7-200, de fabricação da SIEMENS. Este equipamento é responsável por receber todos os sinais dos equipamentos descritos anteriormente. A tabela 4.3 descreve os sinais de entrada, enquanto que a tabela 4.4 descreve os sinais de saída.

Tabela 4.3 – Sinais de entrada do SIEMENS SIMATIC S7-200

Entradas do CLP S7-200				
Índice	Símbolo	Endereço	Comentário	Tipo
1	Contato_auxiliar_KA3	I0.2	Contato auxiliar de KM3	BOOL
2	Pressão em P1	AIW4	Pressão antes da válvula proporcional	INT
3	Pressão em P2	AIW6	Pressão depois da válvula proporcional	INT
4	Nível do Reservatório	AIW8	Nível do reservatório elevado	INT
5	Vazão MT	AIW10	Vazão na tubulação de recalque	INT

Tabela 4.4 – Saídas do SIEMENS SIMATIC S7-200

Saídas do CLP S7-200				
Índice	Símbolo	Endereço	Comentário	Tipo
1	Liga KM3	Q0.2	Comando para Km3 – Conversor de Freqüência	BOOL
2	MM4_On_Off	Q0.4	Comando para MM4	BOOL
3	VCA abertura	AQW0	Sinal para abertura da válvula proporcional	INT

4.3 Automação

Alem do sistema de bombeamento descrito anteriormente, o LAMOTRIZ possui mais três protótipos que representam as principais cargas industriais: sistema de ventilação e exaustão, sistema de correia transportadora e sistema de ar comprimido. Cada um dos protótipos citados anteriormente possui um CLP S7-200, que atua em modo escravo e é responsável pela automação individualizada dos sistemas citados, interligado a um CLP SIEMENS SIMATIC S7-300 que atua como mestre e tem por finalidade congregar os dados oriundos dos CLP´s escravos e encaminhá-los a um computador, denominado de FUNDAMENTAL.

4.3.1 Rede Industrial

São utilizadas duas redes de comunicação de dados entre os protótipos: *PROFIBUS-DP* e *Industrial Ethernet*.

A rede *PROFIBUS-DP* é utilizada para a troca de dados entre um ou mais dispositivos mestre e seus respectivos escravos. Neste caso, o mestre é o CLP SIMATIC S7-300 e os escravos são conversores de freqüência, multimedidores e CLP´s S7-200. A figura 4.13 ilustra a configuração adotada no sistema de automação dos protótipos do LAMOTRIZ.

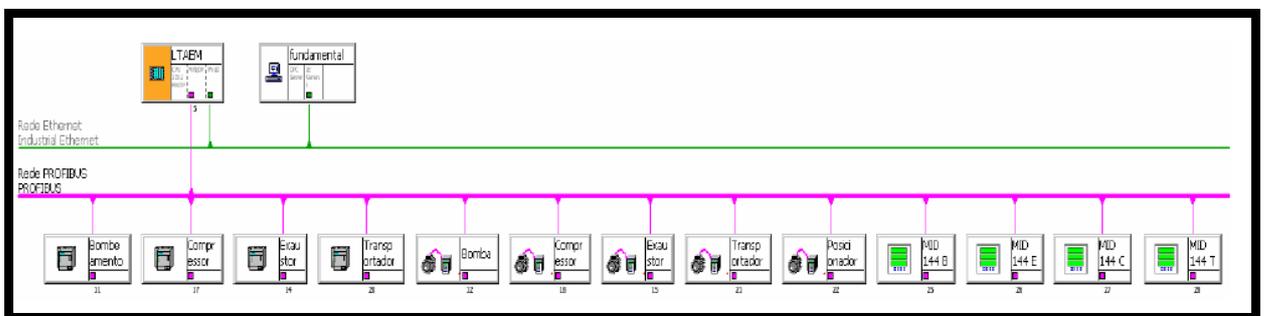



Figura 4.13 – Rede de comunicação PROFIBUS-DP

A rede *Industrial Ethernet* é utilizada para a troca de dados entre o *software* de controle e o CLP S7-300. Este último serve de interface de comunicação entre o computador e os dispositivos dos protótipos que estão conectados aos CLP´s escravos através da rede *Profibus*. A figura 4.14 apresenta a configuração da rede de comunicação do sistema de automação.

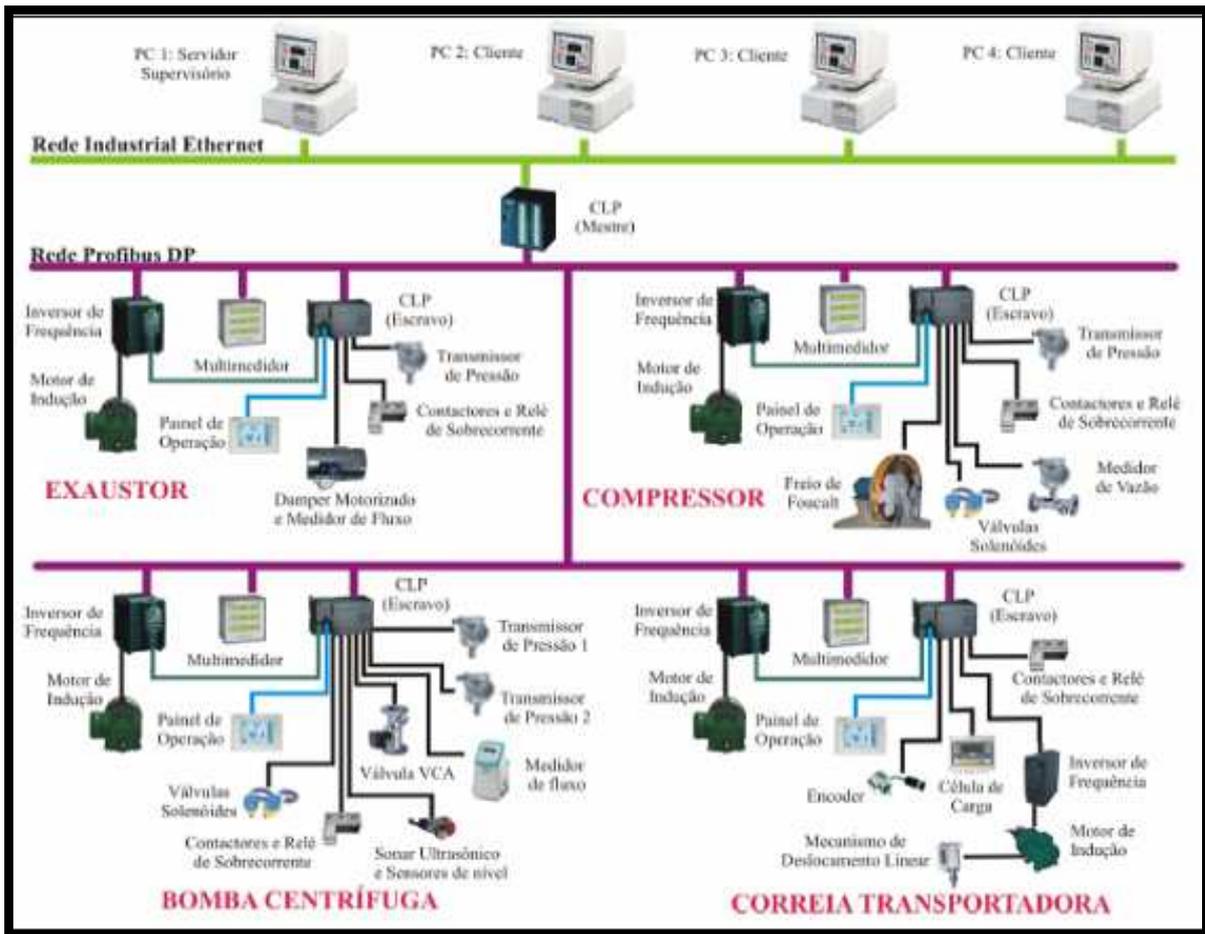



Figura 4.14 – Sistema de automação do LAMOTRIZ

A comunicação entre o software de controle e as memórias de dados do CLP mestre é realizada pelo protocolo OPC (*Object Linking and Embedding for Process Control*).

4.4 Projeto de Software

Para que se tornasse possível controlar e monitorar remotamente os dispositivos do protótipo de bombeamento d’água, foi necessário desenvolver um *software* que fornecesse tais funcionalidades. Dentro dessa perspectiva, o tipo de sistema de *software* adequado é o de tempo real.

Um sistema de processamento em tempo real pode ser definido como aquele que controla um ambiente pelo recebimento de dados, seu processamento e apresentação dos resultados com rapidez suficiente para afetar o ambiente naquele momento (MARTIN, 1967).

O projeto do software de controle e monitoramento do protótipo foi realizado através da análise estruturada proposta por Yourdon (1990). Esta técnica tem por finalidade retratar o fluxo e o conteúdo das informações utilizadas pelo sistema, dividir o sistema em partições

funcionais e comportamentais. Portanto, não há intenção, neste trabalho, de descrever minuciosamente o processo de desenvolvimento do referido software, mas apresentar seu objetivo, seus principais processos de transformação de dados e alguns aspectos da programação utilizada.

Dessa forma, serão apresentados, a seguir, o modelo ambiental e o modelo comportamental do software de controle do protótipo de bombeamento d'água.

4.4.1 Modelo Ambiental

O modelo ambiental descreve o ambiente no qual o sistema se insere, ou seja, descreve o contexto do sistema. Este modelo possui três componentes: declaração de objetivos, diagrama de contexto e lista de eventos.

4.4.1.1 Declaração de Objetivos

A declaração de objetivos é o primeiro componente do modelo ambiental e tem como finalidade declarar de forma textual, concisa e breve os objetivos do sistema. Assim, temos a seguinte declaração de objetivos do sistema de software para controle do protótipo de bombeamento d'água:

O propósito do sistema de software de controle é acionar os dispositivos presentes no protótipo de bombeamento d'água do LAMOTRIZ, bem como monitorar estes dispositivos e as grandezas mecânicas e elétricas envolvidas no processo eficiente, sob o ponto de vista da utilização de energia elétrica, de bombeamento d'água.

4.4.1.2 Diagrama de Contexto

O diagrama de contexto tem como finalidade mostrar os fluxos de dados que entram e saem do sistema de software em estudo. Este diagrama realça diversas características importantes do sistema, tais como: os componentes com os quais o sistema se comunica os dados recebidos do mundo exterior e que devem ser processados e os dados produzidos pelo sistema e que devem ser enviados ao mundo exterior (YOURDON, 1990).

A figura 4.15 apresenta o diagrama de contexto do sistema de software de controle do protótipo de bombeamento d'água.

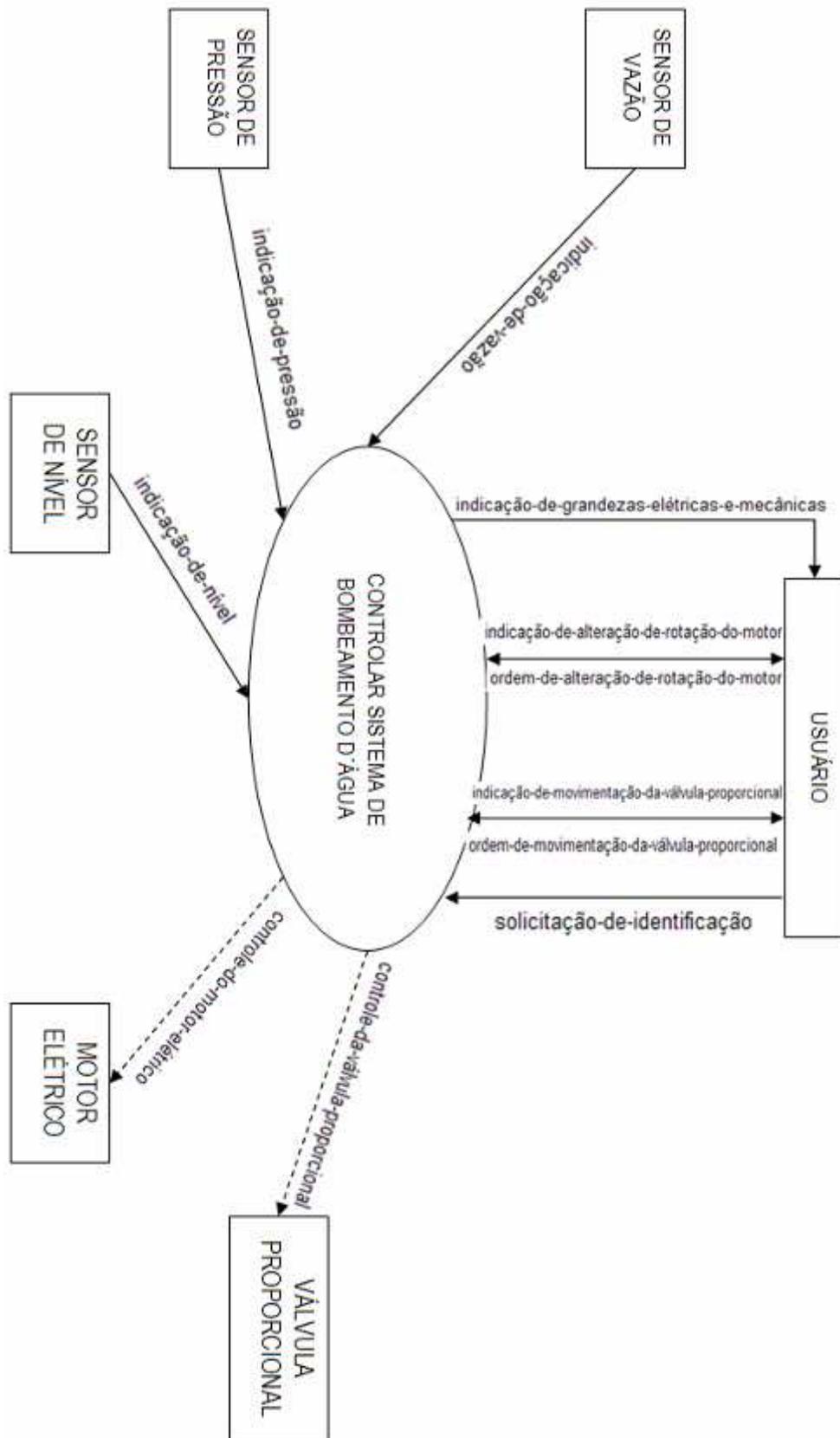



Figura 4.15 – Diagrama de contexto do sistema de software para controle do protótipo.

4.4.1.3 Lista de Eventos

A lista de eventos é uma lista narrativa dos estímulos ou entradas que ocorrem no mundo exterior, e as quais o sistema deve responder (YOURDON, 1990).

Os eventos podem ser de três tipos: orientado por fluxo, evento temporal ou evento de controle. O evento orientado por fluxo é aquele associado a um fluxo de dados, ou seja, o sistema percebe a ocorrência do evento ao receber um ou mais grupo de dados. Por outro lado, o evento temporal é aquele que possui o momento determinado para ser disparado, sendo previsto pelo sistema através de um relógio interno. Já o evento de controle pode ser considerado um caso especial de evento temporal, ou seja, um estímulo que ocorre em algum momento inesperado.

A lista de eventos do sistema de software para controle do protótipo de bombeamento d'água é apresentada na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Lista de eventos do sistema de software para controle do protótipo

EVENTO	TIPO
Usuário solicita identificação	Orientado por fluxo
Usuário solicita abertura da válvula proporcional	Controle
Usuário solicita fechamento da válvula proporcional	Controle
Usuário solicita aumento da velocidade do motor elétrico	Controle
Usuário solicita diminuição da velocidade do motor elétrico	Controle

4.4.2 Modelo Comportamental

O modelo comportamental descreve as ações que o sistema deve realizar para responder da melhor forma aos eventos definidos no modelo ambiental. Este modelo possui cinco componentes: diagrama de fluxo de dados, dicionário de dados, diagrama entidade relacionamento, especificação de processos e diagrama de transição de estados.

4.4.2.1 Diagrama de Fluxo de Dados - DFD

O diagrama de fluxo de dados é uma ferramenta de modelagem que permite imaginar um sistema como uma rede de processos funcionais, interligados por "dutos" e "tanques de armazenamento" de dados (YOURDON, 1990).

Este diagrama é uma das mais utilizadas ferramentas de modelagem de sistemas, principalmente quando suas funções são de fundamental importância e mais complexas que os dados manipulados pelo próprio sistema.

Os DFD`s são organizados em níveis para possibilitar o detalhamento de sistemas complexos. Dessa forma, cada nível é responsável por fornecer maiores detalhes sobre uma parte do nível que lhe seja superior. O diagrama de contexto, apresentado anteriormente, é o DFD de nível mais alto. Abaixo deste tem-se o DFD chamado figura ou nível 0, o qual representa a visa de mais alto nível das principais funções do sistema bem como as principais interfaces entre essas funções.

A figura 4.16 apresenta o DFD nível 0 do sistema de software para controle do protótipo de bombeamento d'água.

As três principais funções, mostradas no diagrama nível 0, são: identificar usuário, controlar válvula proporcional e controlar motor.

Para que um usuário possa utilizar o software é necessário que este usuário esteja autorizado. Cabe ressaltar, neste ponto, que só é fornecido o controle do protótipo de sistema de bombeamento d'água a um usuário por vez, pois seria inviável, para a realização dos ensaios, a utilização simultânea de dois ou mais usuários.

No protótipo do sistema de bombeamento d'água o usuário poderá acionar somente a válvula proporcional e o motor elétrico. Isto porque a válvula é o componente que promove a inserção ou retirada de perda de carga por meio da sua abertura e fechamento, sendo um método de ajuste de vazão a ser estudado. Já o acionamento do motor elétrico ocorre em função do ajuste de vazão por meio da alteração da velocidade do próprio motor, sendo o outro método de ajuste de vazão a ser estudado.

Dessa forma, a função "CONTROLAR VÁLVULA PROPORCIONAL" recebe o fluxo de dados com a liberação do usuário para utilizar o software e, a partir disso, pode receber o fluxo de dados para movimentar a válvula. Como resposta a essas entradas, a referida função envia o sinal de controle para movimentar a válvula e fornece a indicação de movimentação da válvula, bem como a indicação de vazão e pressão, pois essas grandezas são diretamente alteradas de acordo com a abertura ou fechamento da válvula.

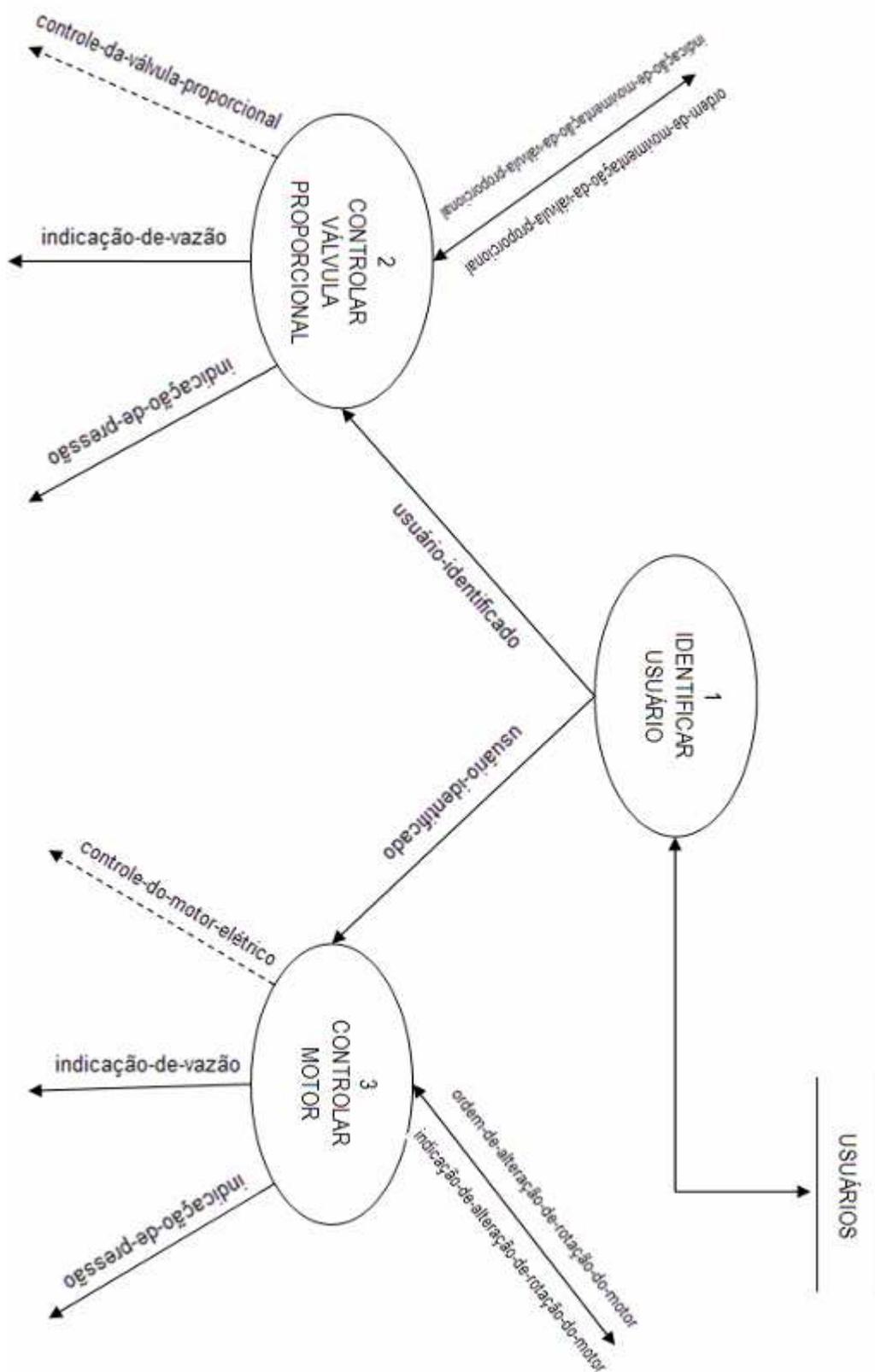



Figura 4.16 – DFD nível 0 do sistema de software para controle do protótipo

De forma análoga a função descrita anteriormente, a função “CONTROLAR MOTOR” recebe fluxos de dados de liberação do usuário e de alteração da velocidade do motor. A partir disso, a função envia o sinal de controle para alterar a velocidade do motor, bem como o fluxo de dados da indicação dessa alteração e da indicação da vazão e pressão.

O próximo DFD, que está no nível imediatamente inferior ao diagrama nível 0, é chamado diagrama nível 1. Nele, existem maiores detalhes sobre a função “CONTROLAR VÁLVULA PROPORCIONAL”. A figura 4.17 apresenta o DFD nível 1.

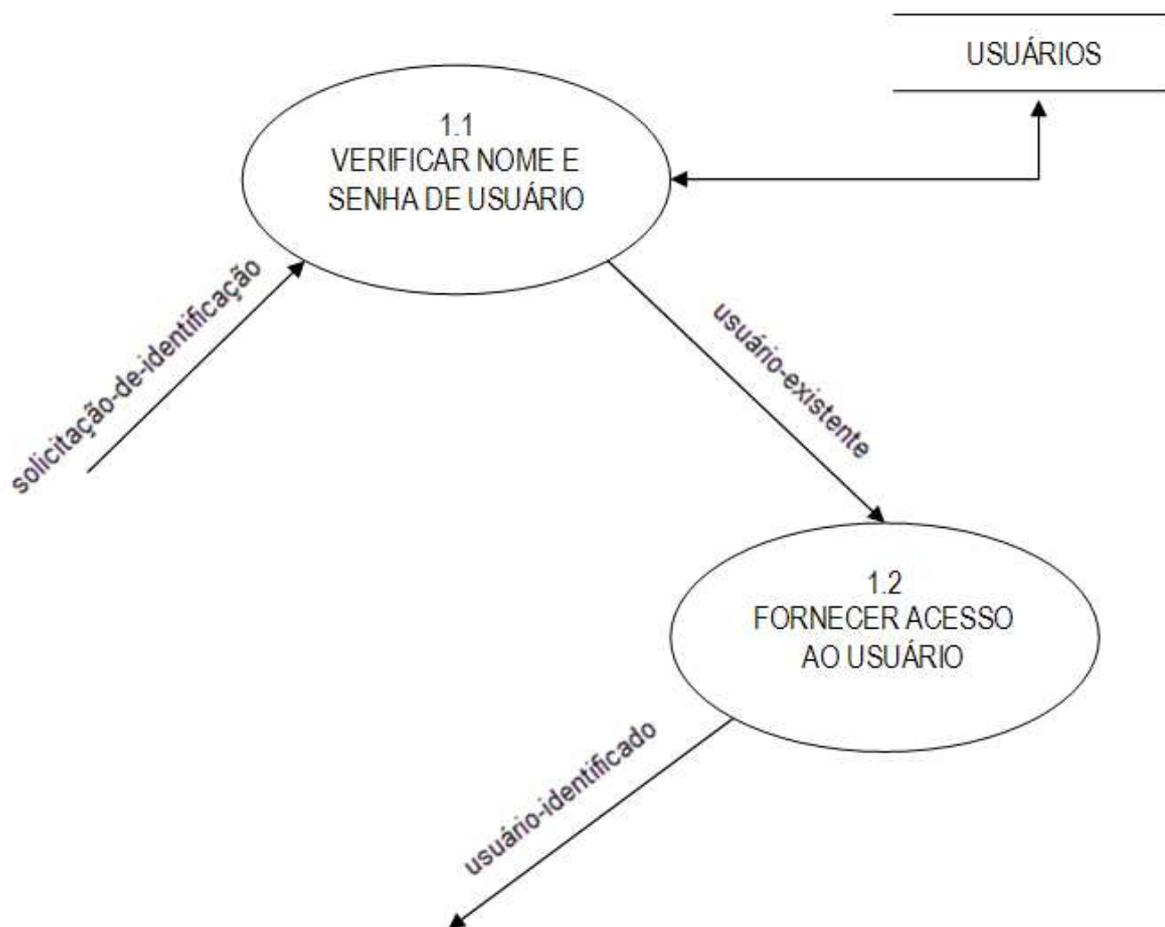



Figura 4.17 – DFD nível 1 do sistema de software para controle do protótipo

Este diagrama possui apenas duas funções, visto que a função “IDENTIFICAR USUÁRIO” tem a finalidade apenas de controlar o acesso dos usuários ao sistema de software.

Dessa forma, a função “VERIFICAR NOME E SENHA DE USUÁRIO’ recebe um fluxo de dados contendo o nome e senha informados pelo usuário. Com esses dados, a função verifica, no depósito de dados de usuários, se o usuário está cadastrado. A partir daí, a função envia um fluxo de dados com o resultado da verificação de cadastro a função “FORNECER

ACESSO AO USUÁRIO”. Esta função, por sua vez, é responsável por liberar o acesso do usuário ao software de controle do protótipo de bombeamento d’água.

O próximo DFD, que está no nível imediatamente inferior do diagrama nível 1, é chamado nível 2. Nele, existem maiores detalhes sobre a função “CONTROLAR VÁLVULA PROPORCIONAL”. A figura 4.18 apresenta o DFD nível 2.

A função “MOVIMENTAR VÁLVULA PROPORCIONAL” é responsável pela abertura ou fechamento da válvula. Através dessa função, o dispositivo recebe o sinal elétrico que irá acioná-lo. Dessa forma, o círculo que representa a função encontra-se tracejado para indicar que esta é uma função ou processo de controle.

No caso de a ordem ser para abertura da válvula proporcional, a função “EXECUTAR ABERTURA DA VÁLVULA PROPORCIONAL” será ativada até que o dispositivo alcance a abertura desejada pelo usuário, fornecendo ao mesmo a indicação da movimentação da válvula. Assim, pelo princípio da retirada de perda de carga através da abertura da válvula, tanto a vazão quanto a pressão serão alteradas, aumentando e diminuindo respectivamente. Além disso, estas grandezas são armazenadas no depósito de dados “GRANDEZAS”.

No caso de a ordem ser para fechamento da válvula proporcional, a função “EXECUTAR FECHAMENTO DA VÁLVULA PROPORCIONAL” será ativada até que o dispositivo alcance o fechamento desejado pelo usuário, fornecendo ao mesmo a indicação da movimentação da válvula. Assim, pelo princípio da inserção de perda de carga através do fechamento da válvula, tanto a vazão quanto a pressão serão alteradas, diminuindo e aumentando respectivamente. Além disso, estas grandezas são armazenadas no depósito de dados “GRANDEZAS”.

O próximo DFD, que está no nível imediatamente inferior do diagrama nível 2, é chamado nível 3. Nele, existem maiores detalhes sobre a função “CONTROLAR MOTOR”. A figura 4.19 apresenta o DFD nível 3.

De forma semelhante a função para movimentar a válvula proporcional, a função “ALTERAR VELOCIDADE DO MOTOR” é responsável por aumentar ou diminuir a velocidade do motor elétrico. Neste caso, o dispositivo que recebe o sinal elétrico para alterar a velocidade do motor, alterando de fato esta velocidade, é o conversor de freqüência. Por se tratar de uma função ou processo de controle, o círculo que a representa encontra-se tracejado.

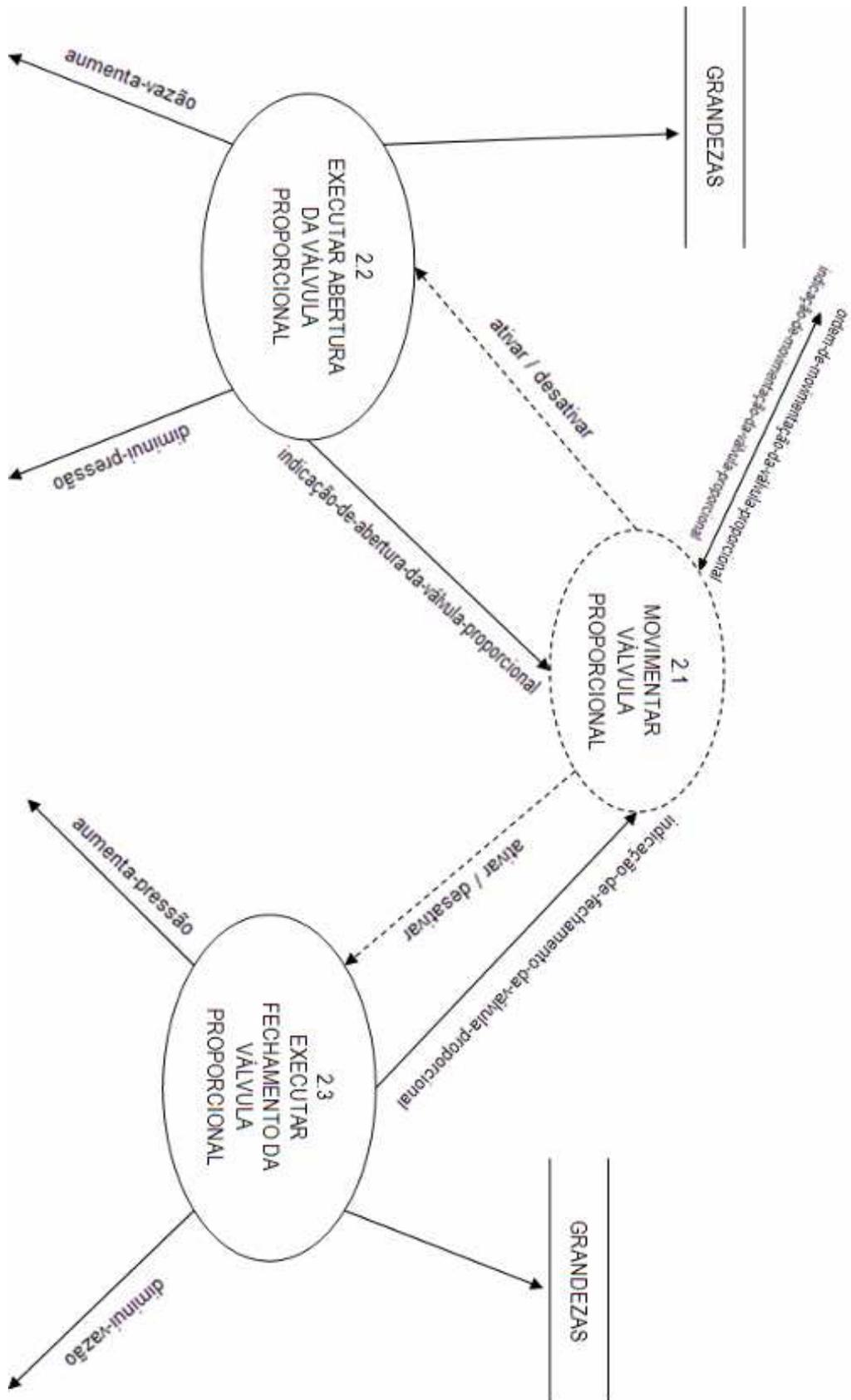



Figura 4.18 – DFD nível 2 do sistema de software para controle do protótipo.

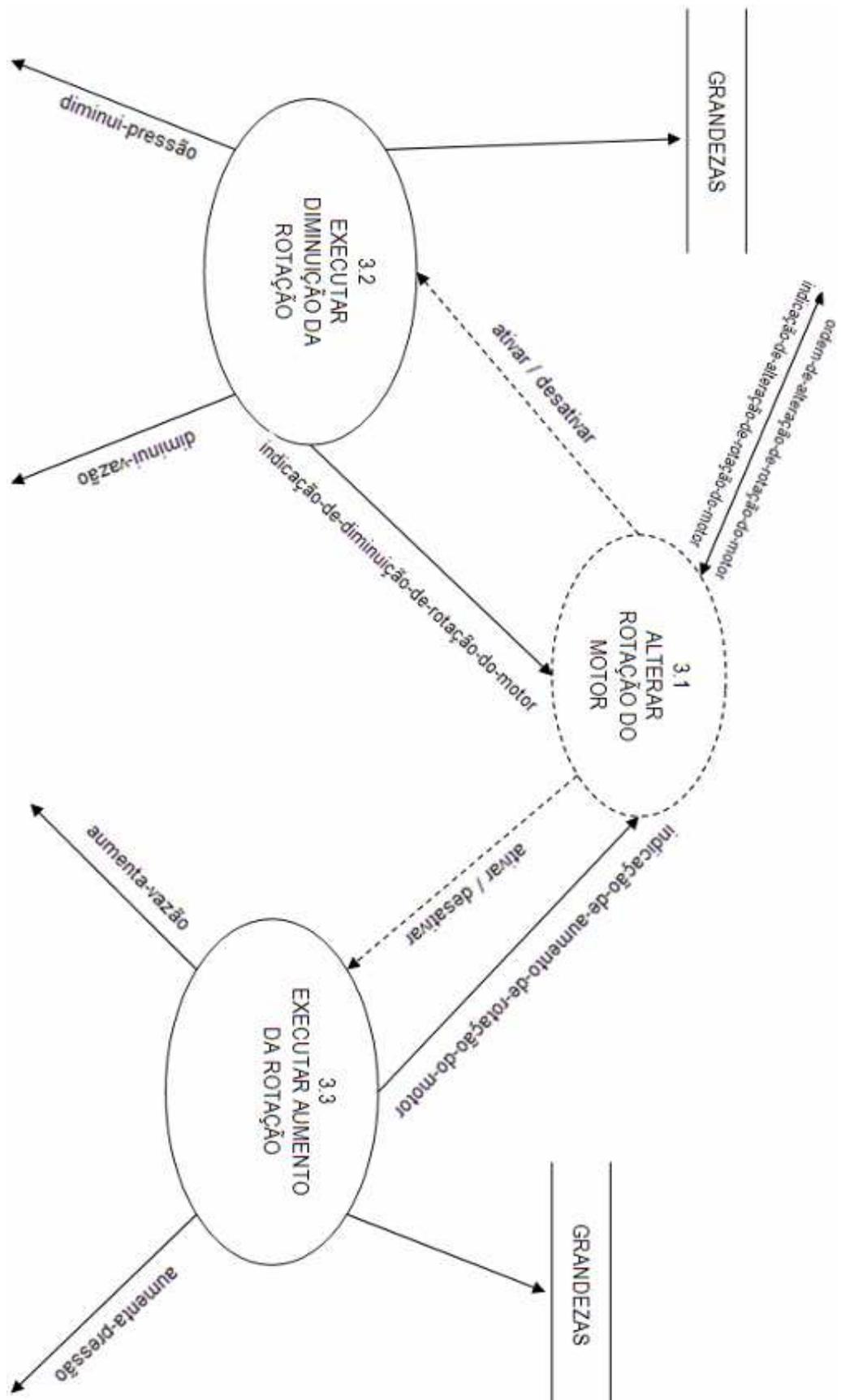



Figura 4.19 – DFD nível 3 do sistema de software para controle do protótipo

Caso a ordem seja para aumentar a velocidade, a função “EXECUTAR AUMENTO DA VELOCIDADE” será ativada até a velocidade desejada pelo usuário, fornecendo a ele a indicação do valor da velocidade.

Assim, aumentando-se a velocidade do motor, aumenta-se tanto a vazão quanto a pressão, sendo que estas alterações são armazenadas no depósito de dados “GRANDEZAS”.

Por outro lado, caso a ordem seja para diminuir a velocidade, a função “EXECUTAR DIMINUIÇÃO DA VELOCIDADE” será ativada até a velocidade desejada pelo usuário, fornecendo a ele a indicação do valor da velocidade. Conseqüentemente, diminui-se tanto a vazão quanto a pressão, sendo que estas alterações são armazenadas no depósito de dados “GRANDEZAS”.

4.4.2.2 Dicionário de Dados

O dicionário de dados é uma listagem organizada de todos os elementos de dados pertinentes ao sistema de software, com definições precisas e rigorosas para que se conheçam todas as entradas, saídas, componentes de depósitos e cálculos intermediários (YOURDON,1990).

O dicionário de dados define os elementos de dados da seguinte maneira:

- Descrevendo o significado dos fluxos e depósitos mostrados nos diagramas de fluxo de dados;
- Descrevendo a composição de pacotes agregados de dados que se movimentam pelos fluxos, isto é, que podem ser divididos em itens mais elementares;
- Especificando os relevantes valores e unidades de partes elementares de informações dos fluxos de dados e depósito de dados.

Para descrever a composição de elementos de dados é necessária uma notação concisa e compacta para definir o significado de palavras comuns. A tabela 4.6 apresenta o dicionário de dados do sistema de software para controle do protótipo de bombeamento d’água, enquanto que a tabela 4.7 apresenta os símbolos utilizados no dicionários de dados.

Tabela 4.6 – Dicionário de dados do sistema de software para controle do protótipo

Elemento de dado	Descrição	Comentário
Controle da válvula proporcional	-	Sinal para o hardware
Controle do motor elétrico	-	Sinal para o hardware
Indicação de abertura da válvula proporcional	Valores = 0 - 90	Unidade: Graus (º)
Indicação de alteração de velocidade do motor	[Indicação de aumento de velocidade do motor | Indicação de diminuição de velocidade do motor]	Status do motor
Indicação de aumento de velocidade do motor	Valores = 0 - 3400	Unidade: RPM
Indicação de diminuição de velocidade do motor	Valores = 0 - 3400	Unidade: RPM
Indicação de fechamento da válvula proporcional	Valores = 0 - 90	Unidade: Graus (º)
Indicação de grandezas elétricas e mecânicas	[vazão | pressão | velocidade | potência do motor | fator de potência | tensão | corrente | energia consumida]	Grandezas registradas em arquivo.
Indicação de movimentação da válvula proporcional	[Indicação de abertura da válvula proporcional | Indicação de fechamento da válvula proporcional]	Status da válvula proporcional
Indicação de pressão	Valores = 0 - 5000	Unidade: bar
Indicação de vazão	Valores = 0 - 4	Unidade: l/h
Ordem de alteração de velocidade do motor	[Aumenta | diminui]	Tipo de alteração
Ordem de movimentação da válvula proporcional	[Abre | fecha]	Tipo de movimentação
Solicitação de identificação	Valores = Nome + senha	Dados de login do usuário
Usuário existente	[verdadeiro | falso]	
Usuário identificado	[verdadeiro | falso]	

Tabela 4.7 – Notação do dicionário de dados

Símbolo	Significado
=	É composto de
+	E
( )	Opcional (pode estar presente ou ausente)
{ }	Iteração
[ ]	Escolha uma das opções alternativas
**	Comentário
@	Identificador (campo chave) de um depósito
|	Separa opções alternativas na construção [ ]

4.4.2.3 Diagrama Entidade Relacionamento - DER

O diagrama entidade relacionamento (DER) é um modelo em rede que descreve a diagramação dos dados armazenados de um sistema em alto nível de abstração (YOURDON, 1990).

A entidade pode ser definida como um conjunto de objetos da realidade modelada sobre os quais se deseja armazenar informações. Já o relacionamento pode ser definido como um conjunto de associações entre entidades (HEUSER, 1998).

A associação de informações a ocorrências de entidades ou de relacionamentos chama-se atributo. Já a quantidade de ocorrências de uma entidade associada a uma ocorrência da entidade em questão através do relacionamento chama-se cardinalidade (HEUSER, 1998).

A figura 4.20 apresenta o DER do sistema de software para controle do protótipo de bombeamento d’água do LAMOTRIZ. O sistema de software em questão necessita registrar os dados dos usuários para permitir acesso somente aos autorizados, ou seja, alunos das disciplinas que realizam experiências no protótipo. Além disso, o sistema necessita registrar os valores das grandezas elétricas e mecânicas, obtidos durante a realização das experiências, para repassá-los aos alunos.

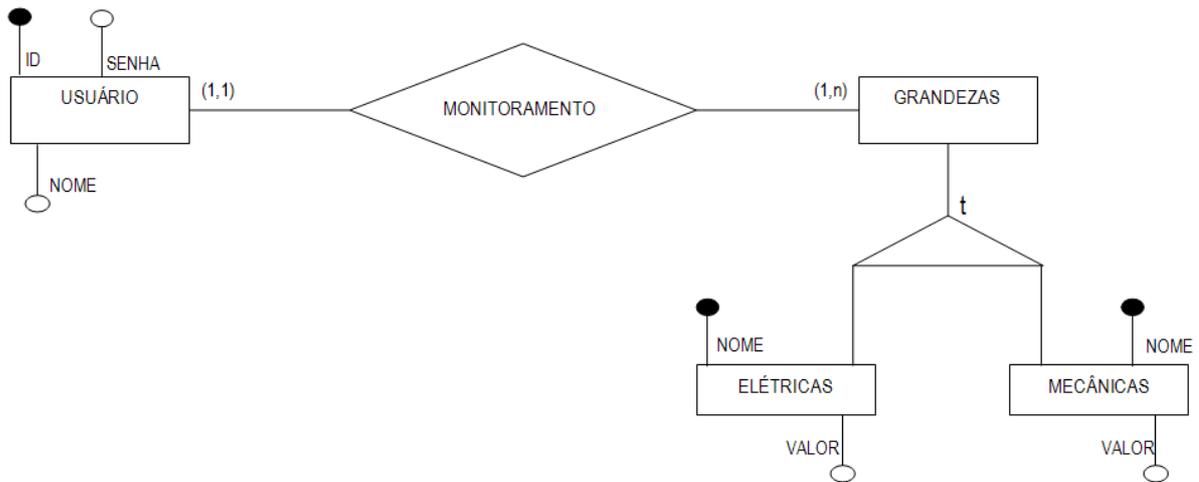



Figura 4.20 – DER do sistema de software para controle do protótipo

4.4.2.4 Diagrama de Transição de Estados - DTE

O diagrama de transição de estados (DTE) descreve o comportamento tempo-dependente do sistema do software, ou seja, apresenta os vários estados em que todo sistema pode assumir e as circunstâncias que o conduzem a uma mudança de estado (YOURDON, 1990).

Os estados representam um determinado comportamento do próprio sistema ou de algum componente em um determinado momento. Já as alterações de estado são regras que controlam as trocas de estado, sendo que estas regras são compostas por condições e ações. As condições são as causas de mudança de estado e as ações são as atitudes compreendidas pelo sistema quando este muda de estado (YOURDON, 1990).

Segundo Yourdon (1990), o DTE é utilizado para modelar o interior de um processo ou função de controle, uma vez que este tipo de processo possui comportamento tempo-dependente. Dessa forma, utilizou-se o DTE para modelar o interior das funções “MOVIMENTAR VÁLVULA PROPORCIONAL” e “ALTERAR VELOCIDADE DO MOTOR”. As figuras 4.21 e 4.22 apresentam, respectivamente, estes diagramas.

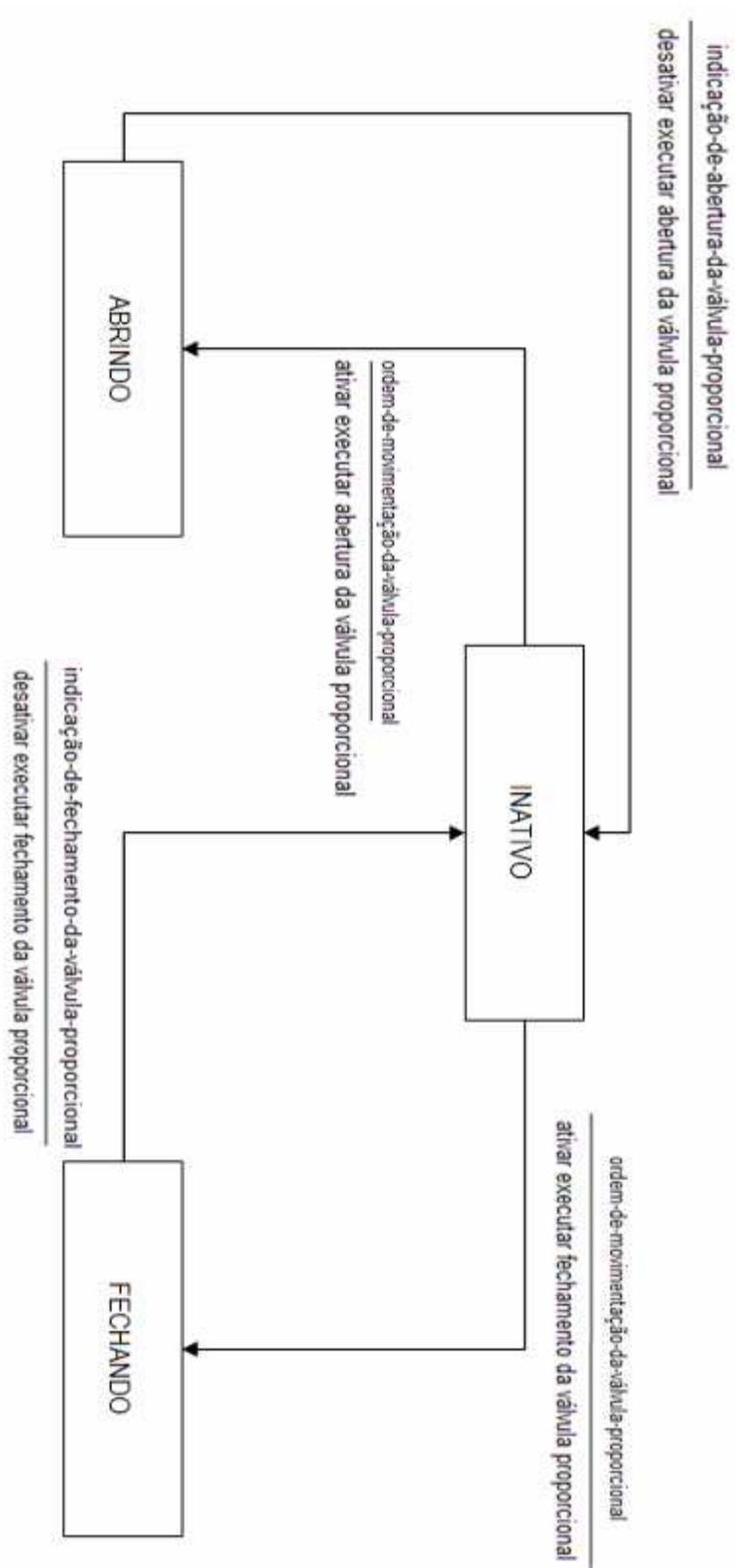



Figura 4.21 – DTE da função “MOVIMENTAR VÁLVULA PROPORCIONAL”

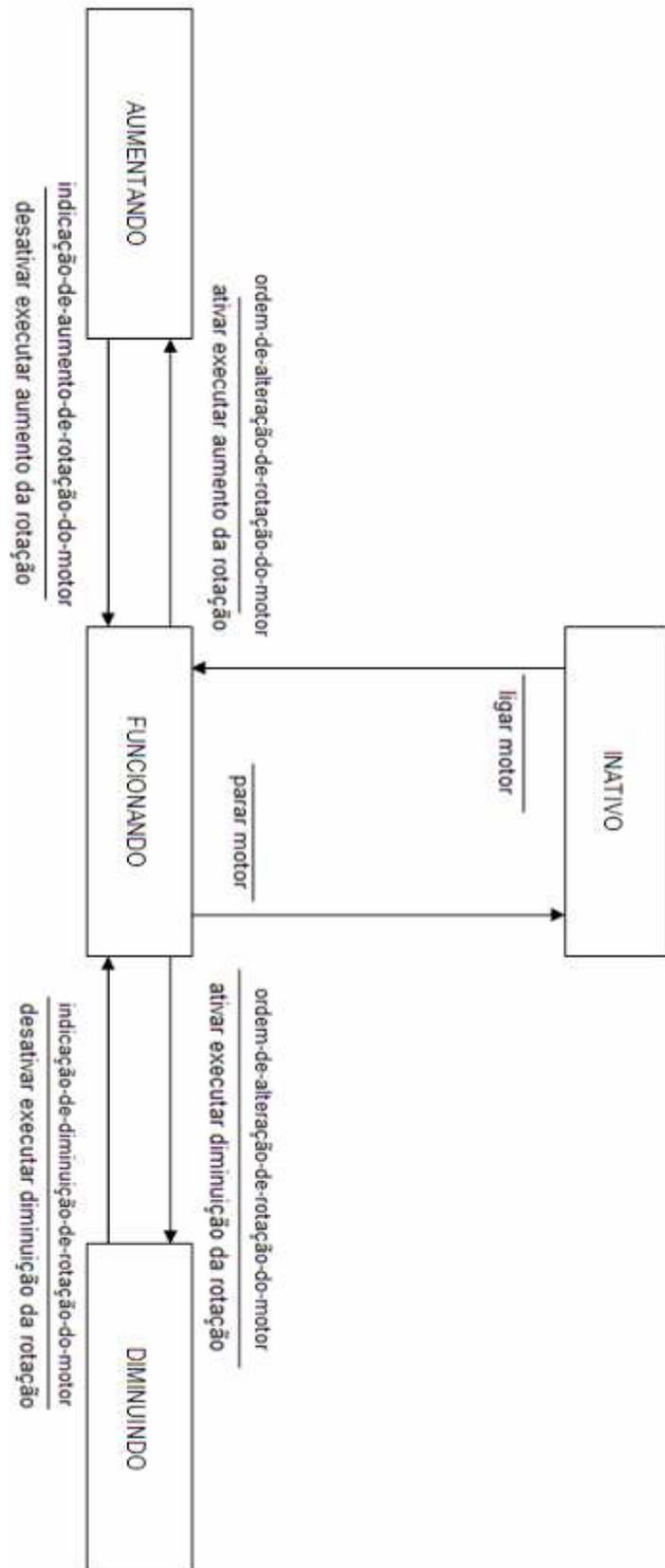



Figura 4.22 – DTE da função “ALTERAR VELOCIDADE DO MOTOR”

A válvula proporcional, conforme o DTE da figura 4.21, possui três estados distintos: inativo, abrindo e fechando. A mudança do estado “inativo” para os estados “abrindo” e “fechando” ocorre quando o usuário insere um ângulo para movimentá-la. Isto representa a condição, ou seja o fluxo “ordem de movimentação da válvula”. Já a ação é o sinal elétrico emitido a válvula para que ela se movimente, o qual é representado pelos fluxos “ativar executar abertura da válvula proporcional” e “ativar executar fechamento da válvula proporcional”. Após a válvula atingir o ângulo determinado pelo usuário, ela passa ao estado “inativo”.

O motor elétrico, conforme o DTE da figura 4.22, possui quatro estados: “inativo”, “aumentando”, “funcionando” e “diminuindo”. A mudança do estado “inativo” para o estado “funcionando” ocorre quando o usuário liga o motor, sendo que, neste caso, não há condição e a ação é o sinal elétrico, representado pelo fluxo “ligar motor”, enviado ao CLP. Cabe ressaltar que o usuário pode inserir um valor de velocidade para que o motor, ao ser ligado, comece a funcionar nessa velocidade. A mudança do estado “funcionado” para os estados “aumentando” ou “diminuindo” ocorre quando o usuário insere um valor de velocidade para aumentá-la ou diminuí-la, sendo representado pelos fluxos “ativar executar aumento da velocidade” e “ativar executar diminuição da velocidade”. Após o motor atingir a velocidade desejada, ele volta ao estado “funcionando”, pois permanece girando na referida velocidade. Para retornar ao estado “inativo” o motor deverá ser desligado pelo usuário.

4.5 Aspectos de Programação

A linguagem de programação utilizada para implementação do *software* foi o *Labview*, versão 7.1. De acordo com Duarte (2006), o *Labview* é uma das principais linguagens de programação utilizadas no desenvolvimento de sistemas supervisórios.

Esta linguagem utiliza ícones gráficos para criar programas, ao invés de linhas de texto. Seus programas são chamados de instrumentos virtuais, ou *VI's* (*Virtual Instruments*), pois sua aparência e operação imitam instrumentos físicos, como osciloscópios e multímetros, que são construídos com uma série de ferramentas com o objetivo de executar a aquisição, análise, demonstração e armazenamento de dados.

Em contraste com as linguagens de programação baseadas em texto, nas quais as instruções determinam a execução dos programas, o *Labview* usa uma programação de fluxo

de dados, sendo que este fluxo determina as operações (DUARTE, 2006). Essa característica corrobora com o modelo descrito pela análise estruturada apresentada anteriormente.

Outra característica determinante da linguagem é a possibilidade de integrar o seu programa a uma página *HTML*, para sua disponibilização na *Web*. Isto é possível através de um servidor *Web* próprio incorporado ao ambiente de desenvolvimento do *Labview*. Para executar a aplicação *Web* o cliente precisa ter o *Labview* ou o *Labview Run-Time Engine.* Este último corresponde a um *plug-in* para o navegador do usuário, sendo que este *plug-in* é responsável pela comunicação entre o referido navegador e o servidor da aplicação, permitindo a interação do usuário.

4.5.1 Métricas de Implementação

A codificação do *software* foi constituída de 264 nós, 43 diagramas, 38 estruturas, 144 linhas, 20 controles, 28 indicadores e 22 variáveis locais.

Os nós[1] são objetos que têm entradas e/ou saídas e permitem a execução de operações entre os blocos de funções. Os diagramas[2] representam os blocos de funções. As estruturas[3] equivalem a representações gráficas de laços e condicional de caso das linguagens de programação baseadas em linhas de texto.

As linhas[4] são objetos pelos quais os dados são transferidos entre os diagramas. Os controles[5] representam as entradas interativas, ou seja, as ações realizadas pelo usuário. Os indicadores[6] representam as saídas interativas, ou seja, a visualização dos dados. A figura 4.23 apresenta um trecho do código gráfico do *software* desenvolvido, onde os números apresentados correspondem aos objetos citados anteriormente.

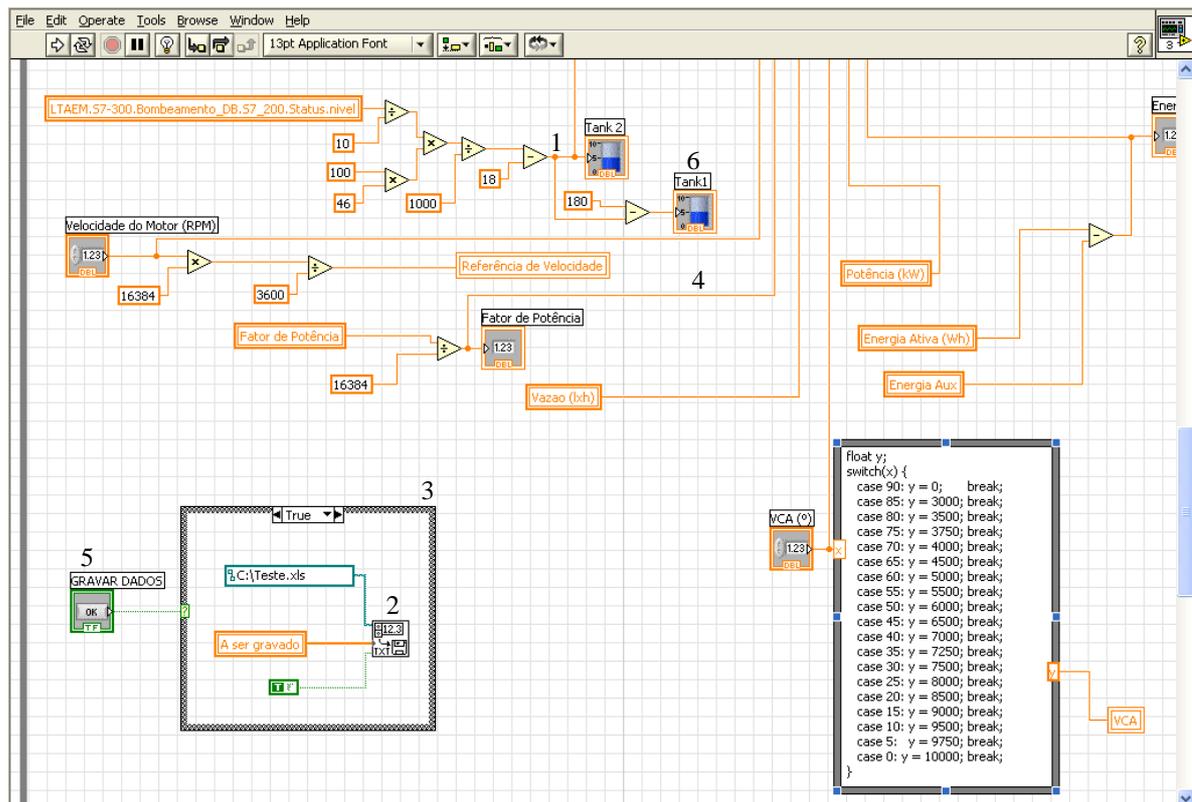



Figura 4.23 – Trecho do código gráfico do *software*

4.6 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o protótipo de bombeamento d'água, bem como seus dispositivos automatizados.

Foi descrito, ainda, o projeto do software para controle do referido protótipo, utilizando a técnica de Análise Estruturada. Esta técnica descreve o sistema por meio das suas funções, sem a preocupação com o modo de implementação do mesmo. Além disso, foram mostrados alguns aspectos da implementação do *software* em *Labview*. Esta linguagem se mostrou adequada tanto ao projeto quanto ao desenvolvimento do *software* proposto.

No próximo capítulo o software será apresentado e serão discutidas as funções descritas no seu modelo de análise.

5. LABORATÓRIO REMOTO PARA ENSINO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA

5.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o software para acionamento e monitoramento do protótipo de bombeamento d'água do LAMOTRIZ. Também, será apresentado o ensaio piloto elaborado para comparar dois métodos de ajuste de vazão: o estrangulamento da tubulação por uma válvula proporcional e a variação da velocidade do motor elétrico. Além disso, serão apresentados os resultados do ensaio piloto, bem como sua avaliação por parte dos alunos de pós-graduação e de graduação que realizaram o referido ensaio.

5.2 Software para Controle do Protótipo de Bombeamento D'água do LAMOTRIZ

O objetivo do software para controle do protótipo de bombeamento d'água do LAMOTRIZ é permitir que o seu usuário acione e monitore os dispositivos do referido protótipo para realizar um ensaio de ajuste de vazão visando eficiência energética, sem a necessidade de estar presente fisicamente no laboratório.

Desse modo, o usuário realiza sua identificação no sistema fornecendo seu número de matrícula da instituição e sua senha. A figura 5.1 apresenta a interface de identificação do usuário.

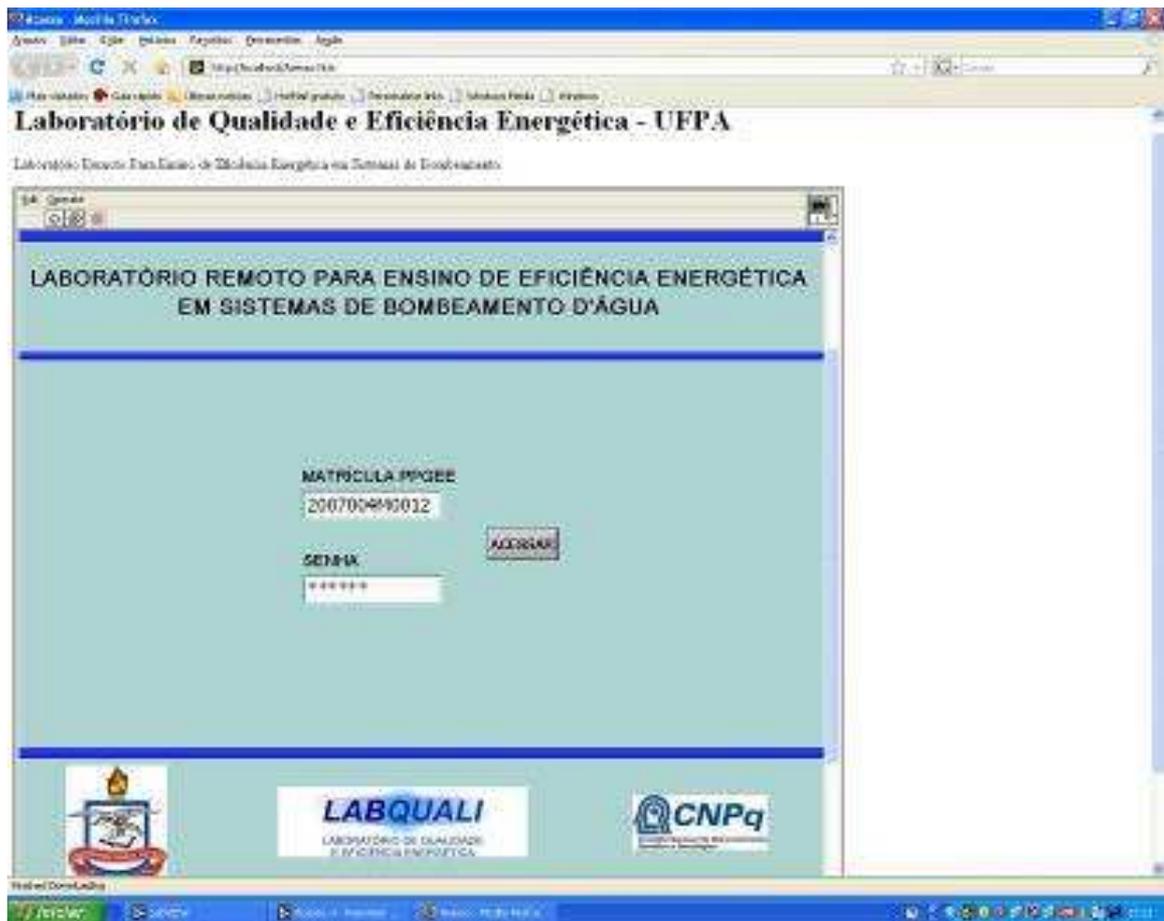



Figura 5.1 – Interface de identificação de usuário do sistema.

Caso o usuário não informe corretamente seus dados ou não possua cadastro, uma mensagem será exibida. A figura 5.2 apresenta a interface com a tela de rejeição de identificação.

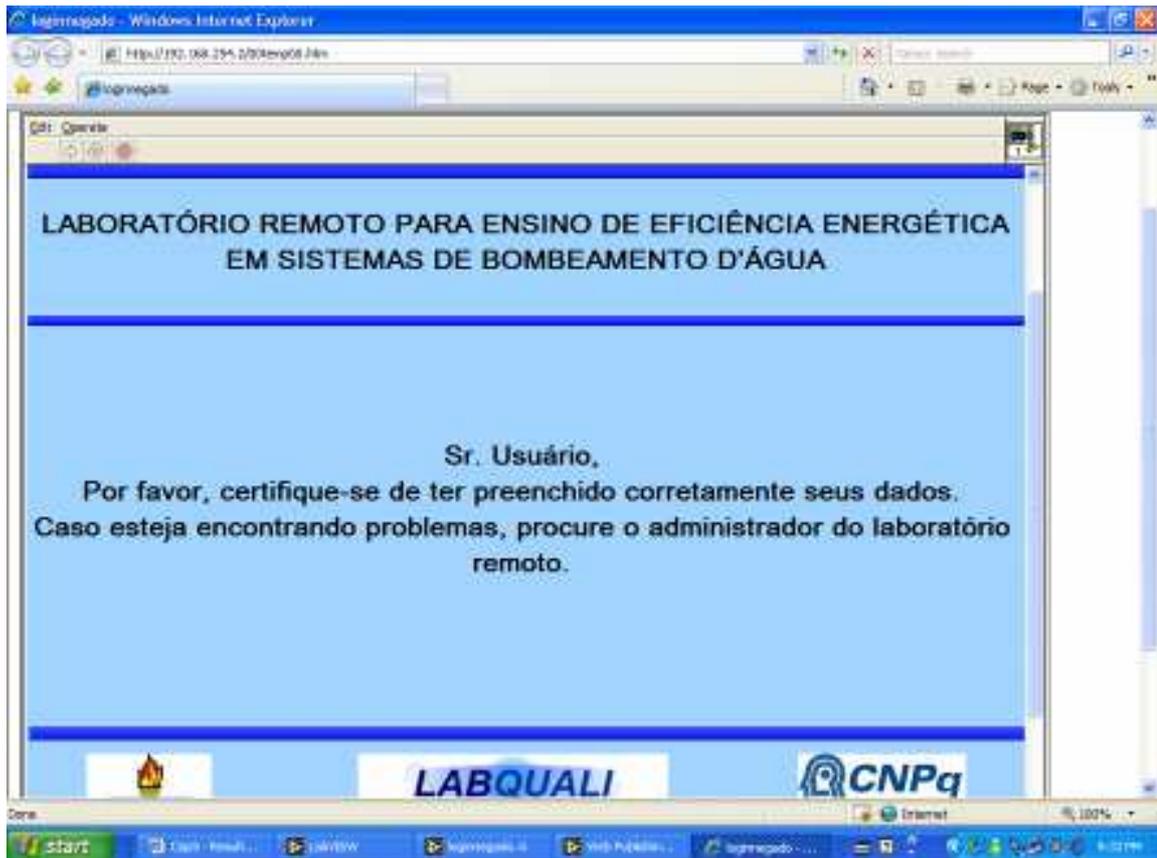



Figura 5.2 – Interface de rejeição de identificação do usuário do sistema.

Após identificar-se o usuário tem acesso a interface principal do sistema. Esta interface foi desenhada a partir da imagem real do protótipo de bombeamento d'água, ou seja, procurou-se reproduzir a planta do processo real. A figura 5.3 apresenta a interface principal do sistema.

Os pontos numerados na figura 5.3 representam os seguintes dispositivos do protótipo:

1. Comandos do inversor de freqüência;
2. Comando para gravar as grandezas elétricas e mecânicas;
3. Grandezas elétricas: tensão e corrente nas três fases do motor, fator de potência, potência e energia;
4. Comando e indicação da velocidade do motor elétrico;
5. Bomba hidráulica;
6. Reservatório inferior com capacidade de 200 litros

7. Comando da válvula solenóide;

8. Medidor de vazão;

9. Medidor de pressão;

10. Comando e indicação da válvula proporcional;

11. Medidor de pressão;

12. Reservatório superior com capacidade de 270 litros.

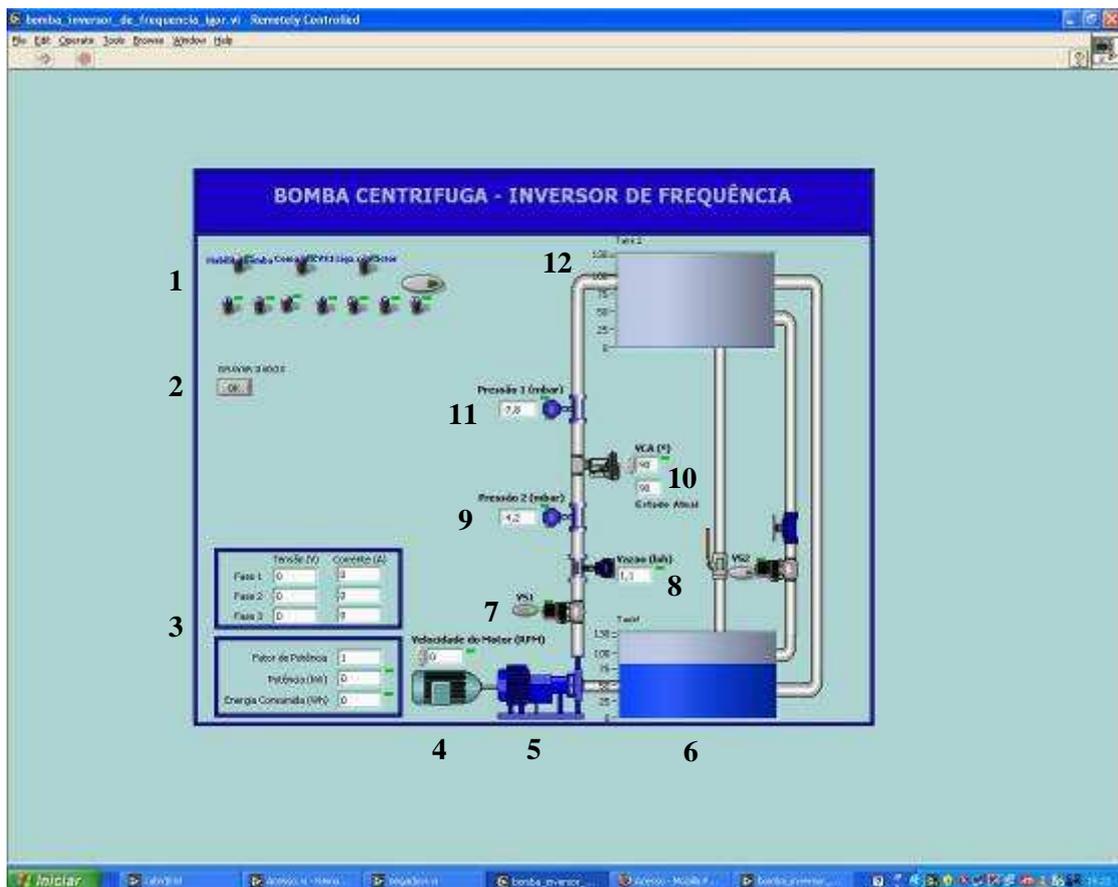



Figura 5.3 – Interface principal do sistema.

Os dados das grandezas elétricas e mecânicas são gravados em uma planilha do Microsoft Excel. A figura 5.4 apresenta esta planilha e seu conteúdo.

V1	V2	V3	I1	I2	I3	Nivel	RPM	FP	Vazao (l/h)	VCA (º)	Potencia (W)	Energia (Wh)
213,263	212,196	214,771	3,889	3,582	3,955	1,747	3400	0,834	331,406	15	973	22
211,547	214,237	211,338	3,538	4,028	3,618	13,23	3400	0,842	662,031	25	958	47
211,987	212,845	210,062	3,728	4,028	3,552	34,024	3400	0,84	1095,469	35	962	68
210,804	213,054	213,17	3,633	3,962	4,058	64,265	3400	0,845	1587,031	45	1000	89
211,129	213,17	211,779	3,816	4,189	4,058	105,22	3400	0,85	2262,344	55	1041	110
84,401	84,401	84,517	2,102	2,117	2,117	126,982	1380	0,907	330,469	90	151	119
92,657	92,542	92,75	2,161	2,175	2,175	132,872	1520	0,916	632,812	90	176	125
116,547	116,547	116,639	2,366	2,38	2,38	153,191	1930	0,941	1066,25	90	269	133
132,179	132,179	132,295	2,542	2,563	2,556	144,217	2200	0,721	1477,5	90	349	150
161,31	161,31	161,426	2,996	3,018	3,01	140,481	2700	0,789	2194,844	90	550	159

Figura 5.4 – Planilha com os dados gravados.

Além de gravar na planilha, os dados são gravados em um banco de dados. Isto ocorre, pois a planilha é repassada ao aluno para que ele faça suas análises, enquanto que o banco de dados serve como registro histórico dos resultados da experiência. Este registro é importante, pois, através dele, será possível estudar as características do protótipo de bombeamento no decorrer do tempo. Assim, será possível comparar, no futuro, o comportamento dos dispositivos isoladamente ou do sistema todo com os dados do passado.

5.3 Ensaio Piloto de Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento D'água

O ensaio piloto, que foi desenvolvido para ser realizado no laboratório remoto, tem como objetivo comparar a eficiência energética na operação de dois métodos de ajuste da vazão em sistemas de bombeamento d'água. O primeiro método consiste no "estrangulamento" da tubulação por meio de fechamento/abertura de uma válvula proporcional automatizada e o segundo método é através da variação da velocidade do motor elétrico por meio de conversor de freqüência.

5.3.3 Resultados do Ensaio Piloto

Após a execução do teste piloto foram encontrados os dados presentes na tabela 5.1 para o método de ajuste de vazão por meio da válvula proporcional e na tabela 5.2 para o método da variação da velocidade do motor.

Tabela 5.1 – Resultados para o método de ajuste de vazão por meio da válvula proporcional.

Vazão (l/h)	Potência (W)	Energia (Wh)
331.406	958	22
662.031	962	47
1095.469	973	68
1587.031	1000	89
2262.344	1041	110
Energia elétrica consumida: 110 Wh		

Tabela 5.2 – Resultados para o método de ajuste de vazão por meio da variação da velocidade do motor.

Vazão (l/h)	Erro (%)	Potência (W)	Energia (Wh)
330,469	0,003	151	9
632,812	0,044	176	15
1066,25	0,027	269	23
1477,5	0,069	349	40
2194,844	0,030	550	49
Energia elétrica consumida: 49 Wh			

Foi utilizado o mesmo volume de água bombeada, 180 litros, nos dois métodos, para que se pudesse comparar diretamente suas potências e suas energias. Além disso, foi calculada a percentagem de erro referente à diferença entre o valor da vazão dos dois métodos, representado pela coluna “Erro (%)” na tabela 5.2.

A partir dos resultados presentes nas tabelas 5.1 e 5.2, elaborou-se um gráfico para comparar, entre os dois métodos de ajuste de vazão citados anteriormente, a potência e outro para energia decorrentes da operação do sistema de bombeamento,

A figura 5.5 apresenta o gráfico, no qual é comparada a potência utilizada nos dois métodos. É possível observar que, para o método que utiliza a válvula proporcional, a potência é quase constante. Isto se deve ao fato de o motor funcionar em suas características nominais de tensão, corrente e potência, fazendo com que este dispositivo utilize quase a mesma potência tanto para uma baixa vazão, quanto para uma vazão maior. Além disso, a potência elétrica possui relação direta com a vazão, conforme a equação 3.15. Dessa forma, quanto maior a vazão, maior será a potência elétrica do motor.

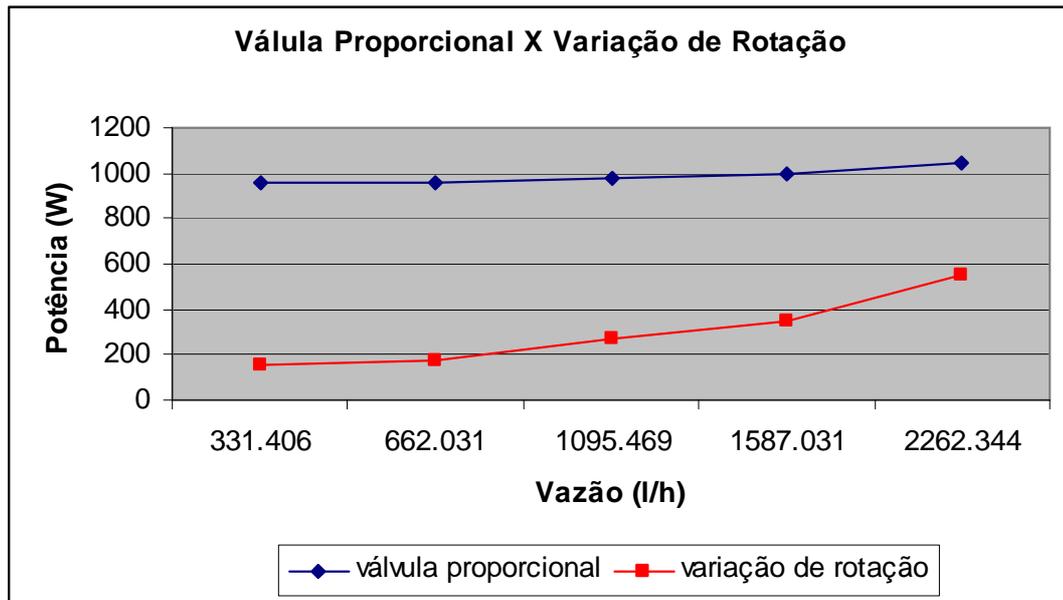



Figura 5.5 – Gráfico Potência X Vazão para os dois métodos.

É possível observar ainda que, para o método que utiliza a variação da velocidade do motor, a potência possui uma variação maior e é menor que no método anterior. Isto ocorre devido à utilização do conversor de freqüência para variação da velocidade do motor. Dado que o conversor do tipo escalar possui relação direta entre a freqüência e a tensão, quanto menor a velocidade, menor será a freqüência e a tensão gerada pelo conversor. Dessa forma, a potência será menor para rotações abaixo da nominal.

O outro gráfico, gerado para comparação da energia elétrica, é apresentado na figura 5.6. Assim como a potência, a energia elétrica consumida pelo motor no método da válvula proporcional é bem maior que a energia elétrica consumida pela variação de velocidade o motor. Isto ocorre devido a energia elétrica ser dada por uma relação direta entre a potência elétrica e o tempo. Dado que o tempo de realização da experiência para os dois métodos foi aproximadamente o mesmo, o valor da energia, neste caso, é dado em função da potência. Dessa forma, como a potência para o método da válvula proporcional foi superior a do

método de variação da velocidade, a energia do primeiro método também será superior a energia do segundo método.

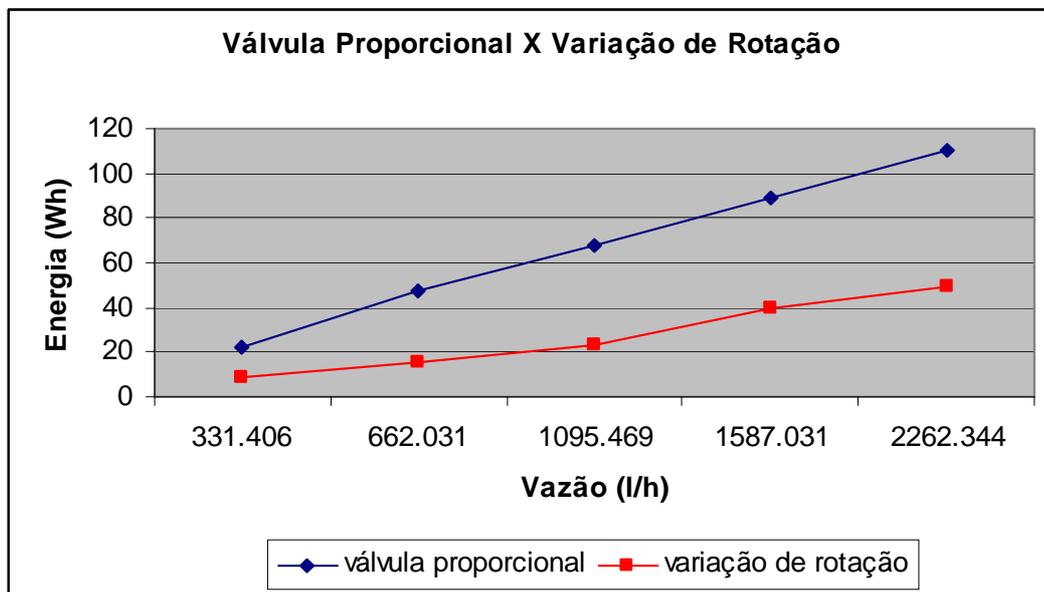



Figura 5.6 – Gráfico Energia X Vazão para os dois métodos.

Além da análise feita pela observação dos gráficos, é possível comparar a eficiência energética dos dois métodos em questão através do consumo específico de energia. Este índice relaciona a energia consumida com o volume de água bombeado.

Uma vez que o tempo de realização da experiência e o volume de água bombeada foram, aproximadamente, o mesmo para os dois métodos de ajuste de vazão, utiliza-se a equação (2.1) com os valores de energia elétrica consumida das tabelas 5.1 e 5.2 para calcular o consumo específico de energia de método de ajuste de vazão.

Assim, temos para o método da válvula proporcional:

$$CE_{val} = \frac{110}{180} = 0{,}61\,\mathrm{Wh/l} \qquad (5.1)$$

e para o método de variação de velocidade:

$$CE_{rot} = \frac{49}{180} = 0{,}27\,\mathrm{Wh/l} \qquad (5.2)$$

Com os resultados das equações (5.1) e (5.2) observa-se que o método de variação de velocidade foi 44,2% mais eficiente que o método da válvula proporcional. Cabe ressaltar que este percentual é válido exclusivamente para o protótipo de bombeamento d’água do

LAMOTRIZ, sendo que, em um sistema de bombeamento industrial, esse percentual poderá ser menor.

5.3.4 Avaliação do Ensaio Piloto

Com objetivo de avaliar a utilidade do ensaio piloto, ele foi passado como tarefa a onze alunos da disciplina Eficiência Energética do Programa de Pós-Graduação e a outros trinta alunos da disciplina Laboratório de Conversão de Energia II da graduação, ambos em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará.

A escolha pela turma da pós-graduação foi motivada pelo fato de o conteúdo dela abranger o estudo proposto nesse trabalho e, além disso, proporcionar, aos alunos, um contato prático com o tema.

Já a escolha da turma da graduação foi motivada pelo fato da respectiva disciplina apresentar um tópico específico sobre o estudo de motores de indução trifásicos. Além disso, objetivou-se proporcionar um contato inicial entre os alunos e o tema de eficiência energética, uma vez que o curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFPA não possui, em seu currículo, uma disciplina específica que aborde o referido tema.

A estratégia utilizada para organização do ensaio foi dividida em quatro etapas. A primeira delas consistiu em ministrar uma aula teórica com noções básicas de sistemas de bombeamento d’água. Além disso, foi mostrado como utilizar o software de controle do protótipo e quais eram os resultados esperados, que deveriam ser apresentados em um relatório. Para a turma da pós-graduação foi estipulado que o relatório valeria 20% da nota da última avaliação da disciplina. Já para a turma da graduação, foi estipulado que o relatório valeria como a nota integral da última avaliação.

A segunda etapa consistiu em enviar o roteiro do ensaio, via correio eletrônico, aos alunos e agendar um dia e horário para que se dirigissem ao LAMOTRIZ, a fim de realizar o ensaio. Os alunos da pós-graduação, por possuírem uma turma reduzida, realizaram o ensaio individualmente. Já os alunos da graduação, por possuírem uma turma maior, realizaram o ensaio em duplas.

A terceira etapa consistiu em receber os alunos no LAMOTRIZ, conforme o dia e horário agendados, e realizar o ensaio propriamente dito. Esta última atividade foi desenvolvida utilizando-se um notebook, conectado a rede wireless do LAMOTRIZ, para

acessar o software de controle do protótipo. Este acesso foi realizado através de uma página temporária hospedada no espaço reservado ao site do laboratório, no servidor da Faculdade de Engenharia Elétrica. A página tinha o objetivo de redirecionar o usuário para o software de controle residente no servidor dentro do LAMOTRIZ. Ao final do ensaio os alunos receberam suas planilhas com os resultados.

A última etapa consistiu em receber os relatórios e solicitar aos alunos que respondessem a um questionário sobre a dinâmica do laboratório remoto. Este questionário continha cinco questões objetivas, de múltipla escolha, e uma questão subjetiva referente a sugestões para melhorar a referida dinâmica.

O questionário foi baseado na característica de usabilidade do produto de software da norma NBR ISO/IEC 9126-1. Esta norma descreve um modelo de qualidade do produto de software, composto de duas partes: qualidade interna e externa e qualidade em uso. A primeira parte do modelo especifica seis características para qualidade interna e externa, que são subdivididas em sub-características (ABNT, 2003). A figura 5.7 apresenta a primeira parte do modelo.

A sub-característica de usabilidade representa a capacidade do produto de software de ser compreendido, aprendido, operado e atraente ao usuário, quando usado sob condições especificadas (ABNT, 2003).

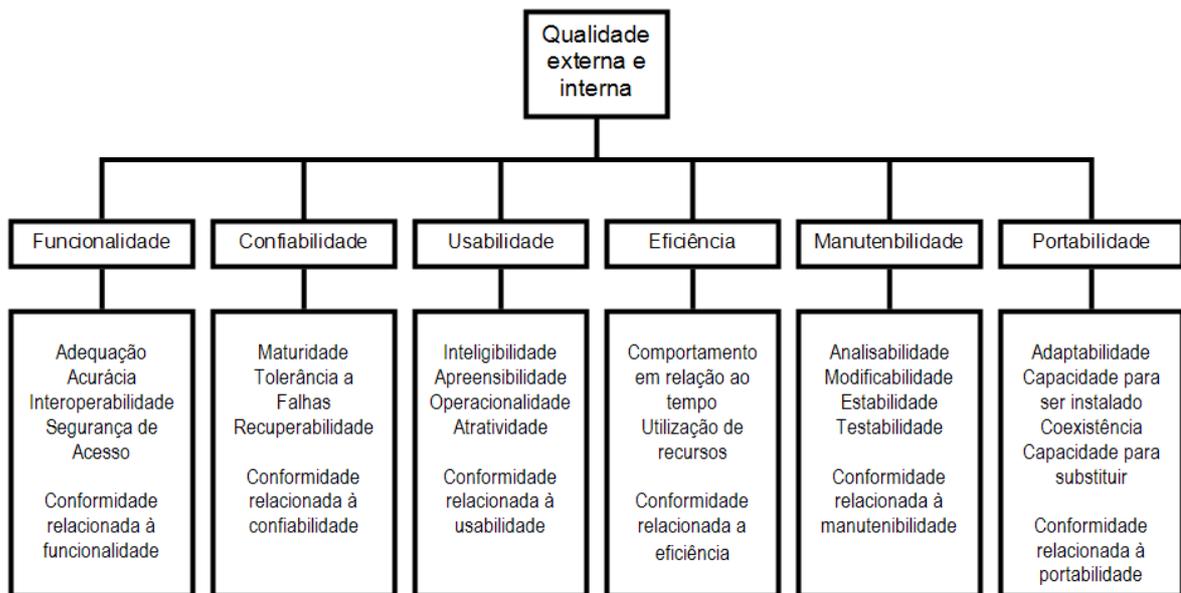



Figura 5.7 – Modelo de qualidade para qualidade interna e externa (ABNT, 2003).

Conforme a figura 5.7, as sub-características de usabilidade são:

- Inteligibilidade: Capacidade do produto de software de possibilitar ao usuário compreender se o software é apropriado e como ele pode ser usado para tarefas e condições de uso específicas.

- Apreensibilidade: Capacidade do produto de software de possibilitar ao usuário aprender sua aplicação.

- Operacionalidade: Capacidade do produto de software de possibilitar ao usuário operá-lo e controlá-lo.

- Atratividade: Capacidade do produto de software de ser atraente ao usuário.

A inteligibilidade foi abordada no questionário sob a seguinte pergunta: Ao utilizar o laboratório remoto, você conseguiu identificar os conceitos teóricos relacionados às experiências propostas? As possibilidades de resposta eram sim e não. A figura 5.8 mostra o gráfico comparando as respostas dadas pelos alunos de pós-graduação e pelos alunos da graduação.

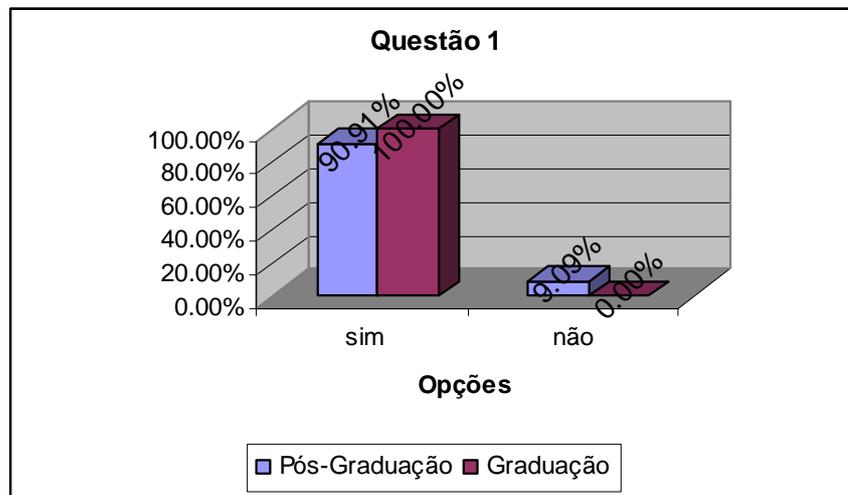



Figura 5.8 – Gráfico com respostas da questão 1 do formulário.

A apreensibilidade foi abordada no questionário sob a seguinte pergunta: Você conseguiu aprender com facilidade a utilizar o aplicativo do laboratório remoto para realizar as experiências propostas? As possibilidades de resposta eram sim e não. A figura 5.9 mostra o gráfico comparando as respostas dadas pelos alunos de pós-graduação e pelos alunos da graduação.

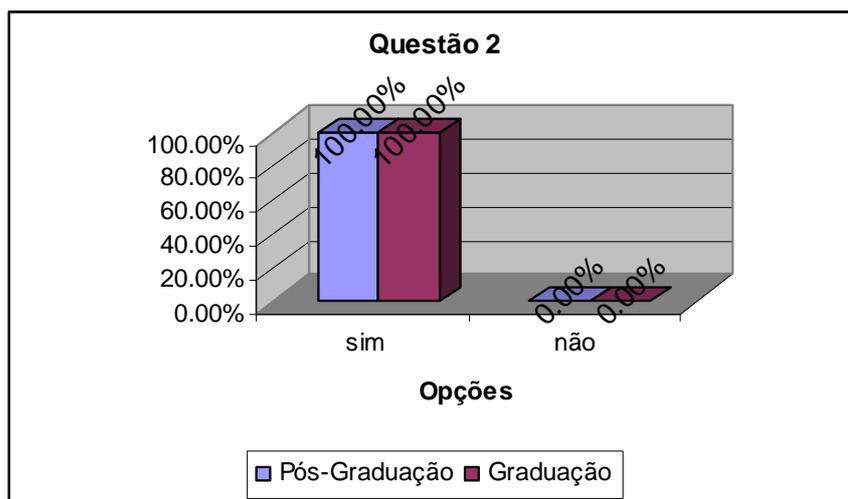



Figura 5.9 – Gráfico com respostas da questão 2 do formulário.

A operacionalidade foi abordada no questionário sob a seguinte pergunta: Você conseguiu operar e controlar com facilidade o aplicativo do laboratório remoto para realizar as experiências propostas? As possibilidades de resposta eram sim e não. A figura 5.10 mostra o gráfico comparando as respostas dadas pelos alunos de pós-graduação e pelos alunos da graduação.

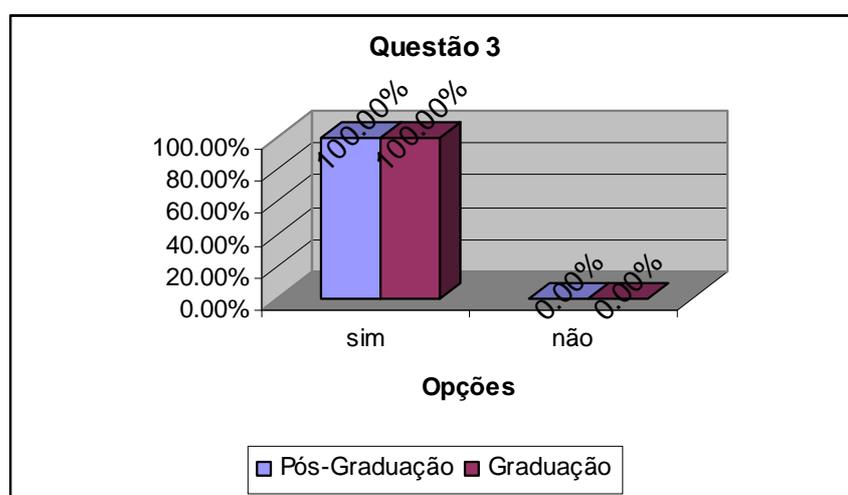



Figura 5.10 – Gráfico com respostas da questão 3 do formulário.

A atratividade foi abordada no questionário sob a forma da seguinte pergunta: O aplicativo do laboratório remoto foi capaz de despertar sua atenção, bem como mantê-la até o final das experiências propostas? As possibilidades de resposta eram sim e não. A figura 5.11 mostra o gráfico comparando as respostas dadas pelos alunos de pós-graduação e pelos alunos da graduação.

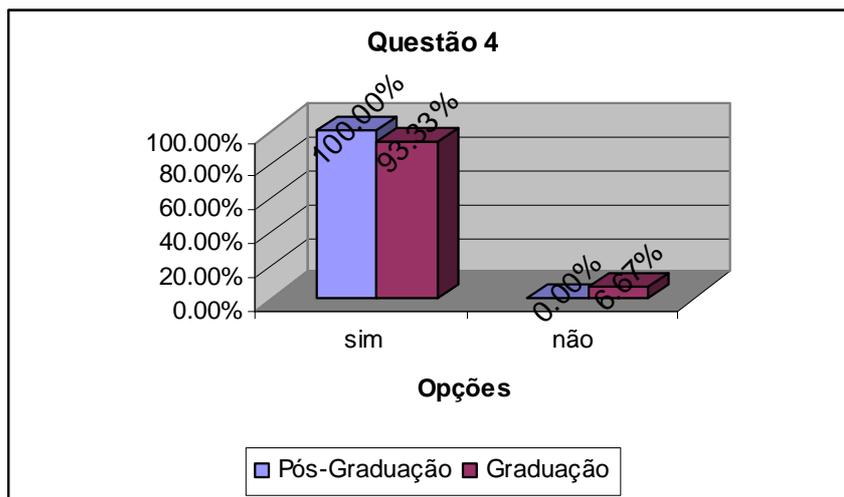



Figura 5.11 – Gráfico com respostas da questão 4 do formulário.

A última pergunta do questionário refere-se à avaliação pessoal do aluno em relação ao ensaio piloto, sendo abordada sob a seguinte pergunta: Qual o conceito que você atribui à metodologia utilizada pelo laboratório remoto? As possibilidades de resposta eram excelente, bom, regular e insuficiente. A figura 5.12 mostra o gráfico comparando as respostas dadas pelos alunos de pós-graduação e pelos alunos da graduação.

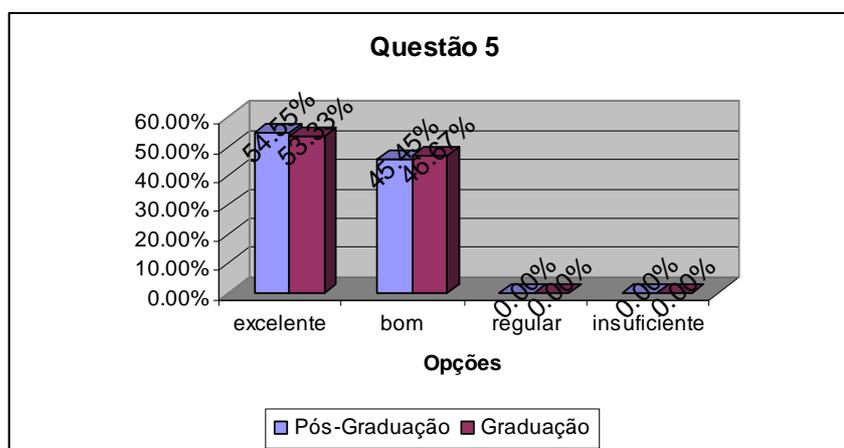



Figura 5.12 – Gráfico com respostas da questão 5 do formulário.

Por fim, o questionário incentivava o aluno a dar sugestões para melhorar a dinâmica utilizada no ensaio piloto. Dentre as sugestões dos alunos de pós-graduação destacam-se: aumentar a precisão dos campos que representam os medidores, incluir indicação da freqüência do motor, simplificar o comando de acionamento do motor, visto que este é subordinado ao envio de parâmetros para o conversor de freqüência e elaborar um manual que forneça mais detalhes sobre os comandos do protótipo além daqueles fornecidos no roteiro do ensaio piloto.

Dentre as sugestões dos alunos de graduação destacam-se: aumentar a precisão dos campos que representam os medidores e elaborar um manual que forneça mais detalhes sobre os comandos do protótipo, além daqueles fornecidos no roteiro do ensaio piloto.

Após analisar os questionários, a sugestão de aumentar a precisão dos campos que representam os medidores foi prontamente atendida. Para isso, bastou apenas alterar a quantidade de casas decimais, dos referidos campos, diretamente no *Labview*. As demais sugestões encontram-se em fase de implantação, visto que não apresentam a mesma simplicidade da sugestão atendida.

5.3.5 Rendimento dos Alunos no Ensaio Piloto

Neste trabalho, também foi levado em consideração o rendimento alcançado pelos referidos alunos em seus relatórios, ou seja, a nota atribuída a cada relatório após sua correção. A figura 5.13 apresenta o gráfico com o rendimento dos alunos da pós-graduação.

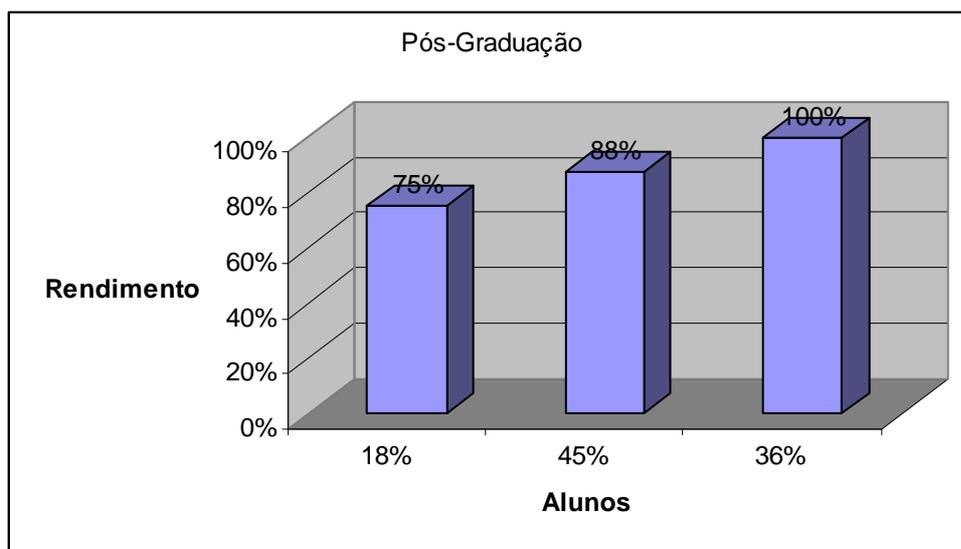



Figura 5.13 – Gráfico com rendimento dos alunos da pós-graduação.

Conforme dito anteriormente, o relatório elaborado pelos alunos da pós-graduação corresponderia a 20% da nota da última avaliação. Assim, 18% desses alunos obtiveram 75% de rendimento, 45% deles obtiveram 88% de rendimento e 36% obtiveram rendimento de 100% na nota do relatório.

Já o rendimento dos alunos da graduação é apresentado no gráfico da figura 5.14. É possível observar que 22% desses alunos obtiveram 85% de rendimento, 13% deles obtiveram 90% de rendimento, 52% obtiveram rendimento de 95% e outros 13% obtiveram 100% de rendimento na nota final do relatório.

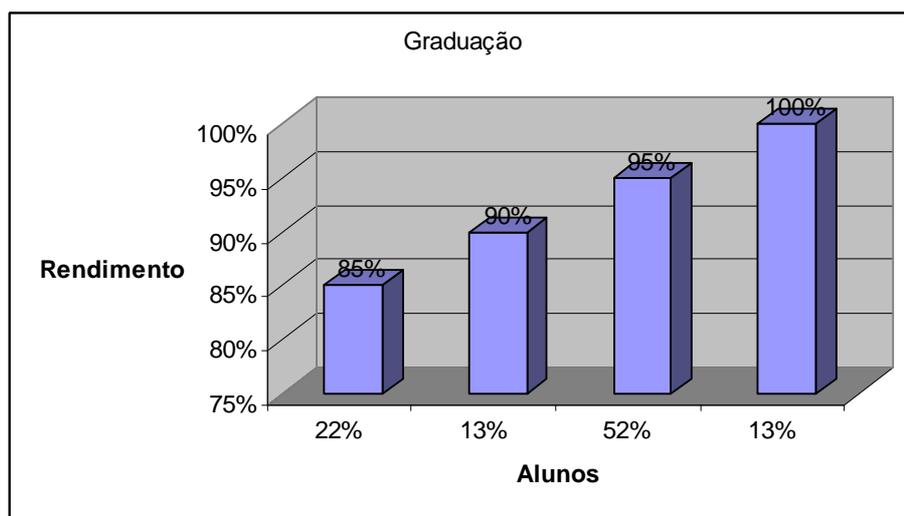



Figura 5.14 – Gráfico com rendimento dos alunos graduação.

De modo geral os alunos alcançaram um bom rendimento, visto que este ficou acima de 75%. Este resultado reforça o resultado obtido pelo questionário, o qual revelou uma grande aceitação dos alunos em relação ao laboratório remoto.

5.4 Conclusão

Este capítulo apresentou o software desenvolvido para controlar remotamente o protótipo de bombeamento d'água do LAMOTRIZ. Foi apresentada também, a metodologia do ensaio piloto elaborado para comparar a eficiência energética entre o método de ajuste de vazão pelo estrangulamento da tubulação por uma válvula proporcional e o método de ajuste de vazão pela variação da velocidade do motor elétrico. Este ensaio utilizou a potência ativa e a energia elétrica consumida, além do índice de consumo específico de energia como parâmetros de comparação.

O resultado apresentado indicou que o método de ajuste de vazão pela variação da velocidade do motor foi 44,2% mais eficiente, em termos de watt-hora por litro de água bombeado, que o outro método.

Também, foi apresentado o teste do ensaio piloto realizado com onze alunos do curso de Pós-Graduação e trinta alunos do curso de Graduação, ambos em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará. Após o ensaio, os alunos apresentaram relatórios, os quais foram avaliados para receberem nota. Em contrapartida, os alunos responderam a questionário avaliando o laboratório remoto.

O questionário foi elaborado a partir do critério de usabilidade da norma NBR ISO/IEC 9126-1, o qual representa a capacidade do produto de software de ser compreendido, aprendido, operado e atraente ao usuário, quando usado sob condições especificadas.

Por último, foi apresentado o rendimento obtido pelos alunos da pós-graduação e da graduação. Foi visto que todos os alunos obtiveram rendimento acima de 75%, o que pode ser considerado bom dentro do sistema de avaliação da universidade.

Desse modo, é possível concluir que o software desenvolvido alcançou de modo satisfatório, seu objetivo de permitir que o aluno acionasse e monitorasse os dispositivos do protótipo de bombeamento d'água do LAMOTRIZ. O ensaio piloto, por sua vez, conseguiu despertar a atenção dos alunos de pós-graduação e de graduação para um assunto bastante discutido pela comunidade acadêmica: métodos de ajuste da vazão em sistemas de bombeamento d'água sob a perspectiva da eficiência energética.

Algumas oportunidades de melhorias foram identificadas pelos próprios alunos através do questionário respondido por eles. Essa interação é importante para este trabalho, pois estimula a atualização constante da tecnologia empregada, da metodologia desenvolvida e do próprio conteúdo abordado.

6. CONCLUSÃO

A partir do acesso ao laboratório remoto, foi possível utilizar o *software* para realizar o ensaio piloto para comparar a eficiência energética entre os métodos de ajuste de vazão por meio da válvula de estrangulamento e por meio da variação de velocidade do motor elétrico, através do conversor de freqüência, acoplado a bomba centrífuga. Assim, foi possível confirmar que o segundo método citado reduz consideravelmente a demanda de potência ativa e, conseqüentemente, a energia elétrica consumida no processo de bombeamento d'água.

Utilizando-se o consumo específico de energia elétrica como indicador de eficiência energética, constatou-se que o segundo método é 44,2% mais eficiente que o primeiro. É importante salientar que esse percentual aplica-se ao protótipo de bombeamento d'água utilizado neste trabalho, sendo que, para sistemas industriais de grande porte, esse percentual poderá ser menor em função das características do projeto e da operação desses sistemas.

Destaca-se como ponto importante desse trabalho a interação dos alunos com o laboratório remoto. Embora a turma da pós-graduação estivesse cursando a disciplina de Eficiência Energética, a realização do ensaio piloto forneceu uma abordagem prática e real da aplicação do conteúdo teórico ministrado em sala de aula.

Por outro lado, a turma da graduação, que cursava a disciplina de Laboratório de Conversão de Energia II, teve a oportunidade de conhecer um pouco sobre eficiência energética, visto que não há uma disciplina que contemple o referido tema na grade curricular do curso de Engenharia Elétrica da UFPA. Além disso, o ensaio piloto possibilitou, a estes alunos, estudar o comportamento do motor elétrico de indução trifásico inserido em uma aplicação real de movimentação de carga, dado que este é um dos objetivos da referida disciplina.

Cabe ressaltar a importância de se inserir a disciplina de eficiência energética na grade curricular não somente do curso de graduação em Engenharia Elétrica, e sim nos demais cursos de Engenharia da UFPA. Isto se justifica pela abrangência do referido tema e pela relevância deste no contexto ambiental.

Ainda em relação à interação dos alunos com o laboratório remoto, ao se confrontar a opinião de ambas as turmas, fornecida pelo questionário, com o rendimento obtido pelos alunos em seus relatórios, é possível fazer uma avaliação positiva do ensaio piloto e da aplicação desenvolvida.

Dessa forma, o protótipo de bombeamento d'água do LAMOTRIZ se mostrou adequado a proposta do laboratório remoto para a realização de ensaios de eficiência energética. Nesse sentido, a principal contribuição desse trabalho é de possibilitar o acesso de alunos, sejam de curso técnico, de graduação ou pós-graduação, ao tema de eficiência energética em um sistema de bombeamento d'água, complementando a formação profissional desses alunos.

6.1 Trabalhos Futuros

Em termos de sugestões para o aperfeiçoamento de conteúdo e adição de novos ensaios, temos:

- Elaborar ensaio para levantamento da curva da bomba, curva do sistema e do ponto de operação do protótipo;
- Elaborar ensaio para verificar a relação entre a freqüência do conversor e a potência ativa;
- Elaborar ensaio comparativo entre motores padrão (*standart*) e de alto rendimento.

Em termos de sugestões para a melhoria do laboratório remoto, temos:

- Implantar sistema de alarme e intertravamento para casos de emergência e implantar câmeras de vídeos e microfones para aprimorar a sensação visual e sonora;
- Integrar, no ambiente do laboratório remoto, os protótipos de compressão, ventilação/exaustão e correia transportadora, com os respectivos ensaios;
- Desenvolver um sistema para gestão dos alunos que utilizam o laboratório remoto, bem como para gestão do conteúdo utilizado.

7. REFERÊNCIAS

____ (2005). Balanço de Energia Útil: Ano Base 2005. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

____ (2003). Plano Decenal de Expansão 2003/2012. Brasília: ELETROBRÁS.

____ (2008). Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12214. Projeto de Sistema de Bombeamento de Água Para Abastecimento Público – Procedimento**. 1992

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10131 Bombas Hidráulicas de Fluxo**. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 9126-1. Engenharia de software - Qualidade de produto - Parte 1: Modelo de Qualidade**. 2003

ARPAIA, P.; BACCIGALUPI, A.; CENNAMO, F.; DAPONTE, P.; **A remote measurement laboratory for educational experiments**., Measurement, vol 21 no 4, pp. 157-169, Agosto de 1997.

ATANASIO, V. et al. **Laboratório Experimental para Ensino de Iluminação em Arquitetura Através de um AVA**. Anais do Congresso Nacional de Ambientes Hipermídia para Aprendizagem. 2006, Florianópolis, Brasil.

BHANDARI, A.; SHOR, M.; **Access to an Instructional Control Laboratory Experiment Through the World Wide Web**., Proc. ACC, Philadelphia, pp. 1319-1325, Junho de 1998.

DUARTE, A. O. de S. M. et al. **Desenvolvimento de um Sistema Supervisório Utilizando Protocolo ProFibus e OPC para Eficiência de Processo Industrial**. Anais da VII Conferencia Internacional de Aplicações Industriais – INDUSCON. Recife, 2006.

FILIPPO Filho, G.E. **Conservação de Energia Elétrica em Sistemas Fluidomecânicos**. XVIII SNPTEE, Outubro de 2005.

GAIO, Marcelo Monachesi. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

GAIO, Marcelo Monachesi; MONTEIRO, Marco Aurélio Guimarães. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento: Manual Prático**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

GOMEZ, F.J.; CERVERA, M; MARTNEZ, J; **A World Wide Web Based Architecture for the implementation of a Virtual Laboratory**, Universidad AutOnoma, Madrid, Espana.

GUEVARA, Y.; CARMONA, R. **Unsteady and Steady Flow Control on Pumping Systems**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 26, NO. 5. SEPTEMBER/OCTOBER 1990.

HADDAD, J. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. Itajubá: FUPAI, 2006.

HENRY, J.; **Engineering Lab Online**., sítio University of Tenn. Chattanooga, http://chem.engr.utc.edu/.

KNIGHT, C.D.; DEWEERTH, S.P.; **World Wide Web-Based Automatic Testing of Analog Circuits**., Proc. 1996 Midwest Symp. Circuits and Systems, pp. 295-298, Agosto de 1996.

LYSHEVSKI, S. E. **Control of High Performance Induction Motors: Theory and Practice**. Energy Conversion and Management, vol. 42, pp. 877-898. 2001

MACHADO, F. V. P. **Eficiência Energética em Conjuntos Moto-bomba**. Anais do II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética - II CBE. 2007, Vitória - ES, Brasil.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1987.

MOSSIN, E. A. **Laboratório Remoto para Ensino a Distância de Sistemas de Controle Distribuídos**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 2006.

NEGRAO, F; LOBATO, J. **Estudo dos Sistemas Motrizes Industriais**. Monografia (Curso de Especialização em Qualidade e Eficiência Energética) – Universidade Federal do Pará. Belém, 2005.

PHYLIPSEN. G.J.M, BLOK, K., WORREL, E. (1997). **International Comparisons of Energy Efficiency-Methodologies for the Manufacturing Industry**. Energy Policy, vol.5, pp. 715-725.

POINDEXTER, S.E.; HECK, B.S.; **Using the Web in Your Courses: What Can You Do? What Should You Do?**, IEEE Control Systems Magazine, vol. 19, no 1, pp. 83-92, fevereiro de 1999.

POTTEBAUM, J. R. **Optimal Characteristics of a Variable-Frequency Centrifugal Pump Motor Drive**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-20, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 1984.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/procel>. Acesso em: 01 de Agosto de 2009.

SALZMANN, C.; LATCHMAN, H.; GILLET, D.; CRISALLE, O.; **Virtual Laboratories and Real-time Experiments in Engineering Education**, ICEE'99, 1999, http://www.fs.vsb.cz/akce/1999/icee99/Proceedings/papers/427/427.htm

SCHMIDLIN Jr., C. R. **Operação do Conjunto Bomba Centrífuga, Motor de Indução Trifásico e Inversor de Freqüência Visando a Eficiência no Uso da Energia Elétrica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Ceará. 2007.

SHAHEEN, M.; LOPARO, K.; BUCHNER, M.; **Remote Laboratory Experimentation**., Proc. ACC, Philadelphia, pp 1326-1329, Junho de 1998.

SILVA, F. E. da; SENA, G. J. de; FISCARELLI, S. H. **Educação e Energia: Rumo ao Desenvolvimento Sustentável.** Revista Ciências Exatas. Taubaté, v. 12, n. 2, p. 115-120, 2006.

SOUZA NETO, Francisco Carlos de. **Programa de Eficientização Industrial: Módulo Bombas**. ELETROBRÁS, Rio de Janeiro (RJ), 2003.

YOURDON, E. **Análise Estruturada Moderna**. Editora Campus, Rio de Janeiro, 1990.

ZADEH, S.V., HENDI, F. (2005). **A Continuous Efficiency Optimization Controller for Induction Motor Drives**. Energy Conversion and Management, vol. 46, pp. 701-713.

APÊNDICE I – ROTEIRO DA EXPERIÊNCIA

Universidade Federal do Pará
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Disciplina: Tópicos Especiais em Sistemas de Potência: Eficiência Energética
Professora: Maria Emília

Roteiro de Experiência

1 - Objetivo

O objetivo deste ensaio é comparar a operação de dois métodos de ajuste da vazão em sistemas de bombeamento d´água. O primeiro método é através do estrangulamento da tubulação por meio de fechamento/abertura de uma válvula e o segundo método é através da variação da velocidade do motor elétrico por meio de inversor de freqüência.

2 – Introdução Teórica

A ação de bombeamento de um fluido pode ser definida como o efeito de adicionar energia a este fluido para movê-lo de um ponto a outro. Como energia é a capacidade de produzir trabalho, adicioná-la a um fluido permite que o mesmo execute um trabalho, ou seja, fluindo através de uma tubulação ou atingindo um ponto com a cota mais elevada. Este efeito é obtido através das bombas que são máquinas operatrizes hidráulicas.

As bombas possuem um ponto de melhor funcionamento para uma determinada vazão, altura (ou carga) e rotação no qual as perdas do escoamento são mínimas. A este ponto denomina-se ponto de operação. É comum que instalações de bombeamento exijam que a bomba opere fora desse ponto pela necessidade de ajustar a vazão.

Usualmente, na indústria, as instalações de bombeamento operam suas máquinas em rotação constante. O ajuste da vazão, principalmente sua diminuição, é feito utilizando-se válvulas que estrangulam a tubulação, sendo que esta prática penaliza energeticamente a instalação.

Outra possibilidade de promover o ajuste da vazão em instalações de bombeamento é através da variação de rotação do motor elétrico acoplado a bomba. Esta prática é recomendada pela comunidade científica por apresentar melhores resultados em termos de eficiência energética.

A seguir será descrito, de forma sucinta, o principio de operação de cada um dos modos de ajuste de vazão citados anteriormente.

2.1 – Ajuste de Vazão por Válvula para Estrangulamento da Tubulação

Este modo de ajuste da vazão consiste em alterar o diâmetro da tubulação por meio da abertura ou fechamento de uma válvula. Dessa forma, o aumento da vazão se dá pela abertura e a diminuição pelo fechamento da válvula.

Esta ação provoca um atrito significativamente maior que o provocado pelo escoamento contínuo em função do choque das moléculas da água entre si e entre as paredes do tubo. Assim, parte da energia cinética da água é perdida, tal qual ocorre em todo processo de transformação de energia na natureza. A esta parcela de energia perdida denomina-se perda de carga localizada.

2.2 – Ajuste de Vazão por Variação de Rotação do Motor

Este modo de ajuste de vazão consiste em variar a velocidade do motor elétrico acoplado a bomba, variando a rotação da mesma. Dessa forma, o aumento ou diminuição da vazão se dá pelo aumento ou diminuição da rotação.

Esta ação promove a variação do ponto de operação da bomba de acordo com a variação da curva do sistema, cuja perda de carga é proporcional a demanda. A eficiência energética pode ser alcançada mantendo-se o rendimento mais próximo possível do Ponto de Máximo Rendimento (PMR) fornecido, pelo fabricante, no manual da bomba.

Dessa forma, a variação do ponto de operação é compensada com a variação da rotação da bomba, de modo que este ponto esteja o mais próximo possível do PMR da bomba.

3 – Metodologia

3.1 – Material Utilizado

Para a realização desta experiência é necessário um microcomputador com acesso a internet, um *browser* para a execução do aplicativo e o *runtime* do *Labview* compatível com a versão do *browser*.

3.2 – Procedimento

Para iniciar a execução do aplicativo acesse o site www.fee.ufpa.br/labquali. Escolha a seção "Laboratório Remoto" e aguarde a tela de acesso ser carregada. Após isso, clique no botão localizado no canto superior esquerdo da tela para iniciar a execução. Em seguida, entre com seu nome de usuário, sua senha e clique no botão "ACESSAR".

Aguarde a abertura da tela principal da aplicação.

3.2.1 – Ajuste de Vazão por Válvula para Estrangulamento da Tubulação

O estrangulamento da tubulação é realizado através de uma válvula do tipo esfera com um atuador elétrico que controla a sua abertura e fechamento. No aplicativo, este dispositivo é denominado de VCA e conta com um botão de comando para acioná-lo e um indicador para o acompanhamento do seu status de movimentação. A figura 1 mostra esses elementos.

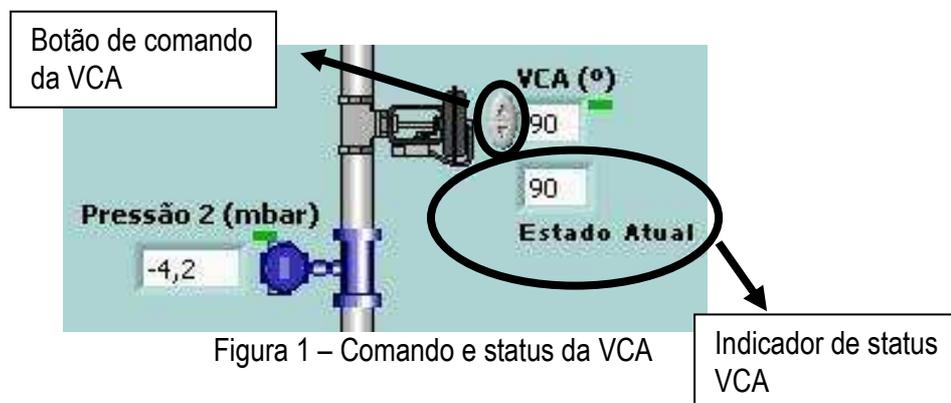
Figura 1 – Comando e status da VCA

Os valores a serem atribuídos a VCA encontram-se na tabela 1.

Tabela 1: Valores de VCA para o experimento.

	Valor de VCA
1	15
2	25
3	35
4	45
5	55

Siga os seguintes passos para realizar o experimento:

a) Acione o botão de comando da VCA até o valor 15 e acompanhe a movimentação da válvula até a posição escolhida.

b) Acione o botão de comando de rotação do motor até o valor de 3600 rpm.

c) Acione o botão para dar partida no motor.

d) Espere a vazão estabilizar e clique no botão “OK” para gravar os dados.

e) Repita os passos “a” e “d” para cada valor de VCA da tabela 1.

f) Ao final do último valor acione novamente o botão para parar o motor.

3.2.2 – Ajuste de Vazão por Variação de Rotação do Motor

A variação de rotação do motor na aplicação é realizada por um botão de comando que envia a rotação selecionada ao inversor de freqüência. Este botão é mostrado na figura 2.

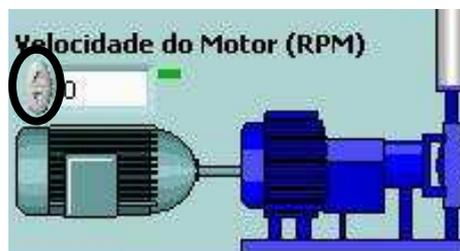



Figura 2 – Comando para ajuste da rotação do motor

Siga os seguintes passos para realizar o experimento:

g) Acione o comando da VCA até o valor 90.

h) Abra o arquivo que foi salvo com os valores do experimento anterior, verifique os valores de vazão gravados e anote-os na tabela 2. Em seguida feche-o.

i) Acione o comando da rotação do motor até que a rotação atingida gere a vazão igual do experimento anterior.

j) Ao atingir a vazão desejada clique no botão “OK” para salvar os dados.

k) Repita os passos “c” e “d” para os outros valores de vazão anotados na tabela 2.

Tabela 2 – Valores de vazão para o experimento

	Valor da vazão
1	
2	
3	
4	
5	

4 - Relatório

O relatório deve conter uma introdução descrevendo o seu objetivo, um breve desenvolvimento teórico sobre os modos de ajuste de vazão abordados na experiência, os resultados obtidos nos ensaios e a conclusão. Utilizar o consumo específico de energia como indicador de eficiência energética.

APENDICE II – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Laboratório de Qualidade e Eficiência Energética

Questionário para Avaliação do Laboratório Remoto para Ensino de Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento de Água

1 – Ao utilizar o laboratório remoto, você conseguiu identificar os conceitos teóricos relacionados as experiências propostas?

☐ SIM ☐ NÃO

2 – Você conseguiu aprender com facilidade a utilizar o aplicativo do laboratório remoto para realizar as experiências propostas?

☐ SIM ☐ NÃO

3 – Você conseguiu operar e controlar com facilidade o aplicativo do laboratório remoto para realizar as experiências propostas?

☐ SIM ☐ NÃO

4 – O aplicativo do laboratório remoto foi capaz de despertar sua atenção, bem como mantê-la até o final das experiências propostas?

☐ SIM ☐ NÃO

5 – Qual o conceito que você atribui a metodologia utilizada pelo laboratório remoto?

☐ EXCELENTE ☐ BOM ☐ REGULAR ☐ INSUFICIENTE

6 – Caso você tenha alguma sugestão, compartilhe-a conosco:

____
____
____
____
____
____
____
____
____